

[illegible]

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ  
КАФЕДРА ПРОМИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

До захисту допущено

Завідувач кафедри

Ю.С. Ямненко

(підпис)

(ініціали, прізвище)

”\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2019р.

**Дипломний проект**  
на здобуття ступеня бакалавра

з напрямку підготовки \_\_\_\_\_ 6.050802 Електронні пристрої та системи  
(код та назва напрямку підготовки або спеціальності)

на тему \_\_\_\_\_ Зарядний пристрій високовольтного акумулятора \_\_\_\_\_

Виконав: студент \_\_\_\_\_ 4 \_\_\_\_\_ курсу, групи \_\_\_\_\_ ДС-51 \_\_\_\_\_

Білий Максим В'ячеславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник \_\_\_\_\_ доц., к.т.н., доц. Вербицький Є.В. \_\_\_\_\_

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультанти:

\_\_\_\_\_ (назва розділу)

\_\_\_\_\_ (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_ ст. викл. Бевза О.М. \_\_\_\_\_

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Київ – 2019 року

Плакати: схема структурна, схема електрична принципова, модель схеми електричної принципової.

## 6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технічний			

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строки виконання етапів проекту	Примітка
1	Огляд сучасних електричних транспортних засобів та методів їх заряджання	04.02 – 15.03	
2	Розробка структурної схеми	16.03 – 27.03	
3	Розробка схеми електричної принципової	28.03 – 20.04	
4	Розрахунок сил опору транспортного засобу	21.04 – 01.05	
5	Розрахунок ємності акумуляторної батареї	02.05 – 12.05	
6	Розрахунок режимів роботи перетворювача	13.05 – 20.05	
7	Розробка алгоритму заряджання	21.05 - 27.05	
8	Моделювання в програмі	28.05 - 06.06	
9	Підготовка до захисту ДП	07.06 – 17.06	
10	Захист ДП	18.06 - 20.06	

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)М. В. Білий\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

\_\_\_\_\_  
(підпис)Є. В. Вербицький\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

## АНОТАЦІЇ

Темою роботи є розробка системи заряджання високовольтного акумулятора електробуса. В ході роботи проведено аналіз та розрахунок зарядного пристрою високовольтного акумулятора для електробуса, з урахуванням сил опору, які діють на нього під час руху.

В роботі було обрано акумулятор відповідно до розрахунків енергії, яка витрачається на рух електробусу між зупинками, розраховано режими роботи перетворювача то розроблено алгоритм роботи такої схеми. Розроблено систему керування та обрано необхідні драйвера для керування силовими ключами. Проведено моделювання розробленої системи. Обрано елементи, які забезпечать живлення такої системи

## ANNOTATION

The theme of the work is the development of a charging system for a high-voltage battery of an electric bus. During the work the analysis and calculation of the charger of a high-voltage battery for an electric bus was carried out, taking into account the resistance forces acting on it during movement.

In the work, the battery was selected in accordance with the calculations of energy, which is spent on the movement of the electric bus between the stops, calculated modes of the converter then developed an algorithm for such a scheme. A management system is developed and the necessary drivers for power key management are selected. The simulation of the developed system was carried out. Elements that provide power to this system are selected.

*Ключові слова:* електробус; заряджання акумулятор.

*Key words:* electric bus; charging; battery.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	5
<b>1. РОЗГЛЯД ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ І РЕЖИМІВ ЙОГО ЗАРЯДЖАННЯ</b> .....	6
1.1 Коротка характеристика сучасних міських електричних транспортних засобів.....	6
1.2 Порівняння транспорту з двигуном внутрішнього згорання та електродвигуном .....	7
1.3 Основні вимоги до тягового електрообладнання .....	10
1.4 Порівняння типів акумуляторів .....	12
1.5 Способи транспортування електроенергії від мережі до тягової системи транспортного засобу.....	15
1.6 Основні методи зарядки .....	19
1.7. Принцип заряджання високовольтного акумулятора пропонованого транспортного засобу .....	23
<b>2 РОЗРАХУНОК СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ</b> .....	26
2.1 Схема електрична структурна електробуса.....	26
2.2 Схема електрична принципова .....	26
2.3 Принципова схема силової частини зарядного пристрою .....	28
2.4 Принципова схема перетворювача 600 - 24 В.....	31
2.5 Опис режимів руху транспортного засобу .....	33
2.6 Розрахунок сил, які діють на транспортний засіб.....	35
2.7 Розрахунок режимів руху транспортного засобу.....	38

					ДС51.510202.001.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Білий М. В.		11.06.19	Зарядний пристрій високовольтного акумулятора Пояснювальна записка			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Вердицький Є.В.		11.06.19						3	70
								НТУУ «КПІ» ім. І. Сікорського ФЕЛ Каф ПЕ			
Н. Контр.		Батрак Л.М.		11.06.19							
Затверд.		Вердицький Є.В.		11.06.19							

2.8	Розрахунок акумуляторної батареї.....	44
2.9	Розрахунок елементів силової частини схеми зарядного пристрою .....	47
2.9.1	Розрахунок для понижуючого перетворювача .....	47
2.9.2	Розрахунок для підвищувального перетворювача .....	49
2.10	Розрахунок перетворювача 600-24В .....	51
2.11	Розрахунок трансформатора перетворювача .....	52
2.12	Розрахунок драйвера транзистора .....	55
2.13	Вибір драйвера для керування перетворювачем.....	56
<b>3</b>	<b>МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЗАРЯДНОГО ПРИСТРОЮ.....</b>	<b>58</b>
3.1	Алгоритм заряджання .....	58
3.2	Модель для заряджання акумулятора .....	59
3.3	Модель для розряджання акумулятора .....	61
3.4	Алгоритм розряджання.....	62
3.5	Живлення для системи керування .....	62
	<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>66</b>
	<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ..</b>	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
	<b>ABSTRACT</b>	

## ВСТУП

Перші машини на електротязі, які перевозили людей, були запропоновані ще в 19 столітті. Після ж появи автомобілів з двигунами внутрішнього згорання (ДВС), ці електробуси втратили свою популярність, оскільки зменшення ціни на паливо та більша простота в експлуатації зробили транспорт на паливі більш економічно привабливим.

Тоді електробусам заважала мала ємність акумуляторних батарей та великий час їх заряджання.

Наразі ж у зв'язку з екологічним станом планети, вчені почали розглядати транспорт на електротязі як альтернативний і більш екологічний вид транспорту в містах. Розроблялись нові технології зберігання енергії в акумуляторах та розширювались можливості їх експлуатації. Відповідно почали з'являться акумулятори з більшою питомною ємністю та швидкі методи їх заряджання, які можна було підібрати під різні режими роботи акумуляторної батареї.

Існуючий електротранспорт можна поділити на дві частини: трамваї та тролейбуси, які живляться безпосередньо від електромережі та мають низьку мобільність, і електробуси, які живляться здебільшого від акумулятора та мають кращу мобільність. Незважаючи на високу мобільність електробуси зараз використовують дуже рідко через високу ціну акумулятора, тому з економічної точки зору доцільно розробити вид електротранспорту з низькою ємністю акумуляторної батареї та високою мобільністю. За базу цього транспорту береться тролейбус, до якого додається високовольтний акумулятор, завдяки якому він матиме здатність здійснювати пересування по неелектрифікованих ділянках свого маршруту автономно.

В дипломній роботі розробляється система електророзживлення запропонованого транспортного засобу з високовольтним акумулятором.

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



# 1. РОЗГЛЯД ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ І РЕЖИМІВ ЙОГО ЗАРЯДЖАННЯ

## 1.1 Коротка характеристика сучасних міських електричних транспортних засобів

Електричними називають такі види транспорту, рух яких здійснюється за допомогою тягових електродвигунів.

Міський електричний транспорт (МЕТ) – це масовий міський транспорт, призначений для маршрутного обслуговування населення. Він повинен забезпечувати: максимальну надійність і безпеку руху; максимальну зручність для пасажирів при мінімальній вартості перевезень; необхідну частоту і регулярність руху на лінії; мінімальний рівень шуму [1].

Основні види міського електричного транспорту – трамвай, тролейбус і метрополітен. В окремих випадках використовуються монорельсові дороги, теплоелектричний, електромобільний транспорт та інше.

Вітчизняні виробники автотранспорту по власній ініціативі уже тривалий час підтримують тренди екологічної безпеки електротранспорту і намагаються підвищити їх комфортабельність в містах. Разом із цим з'являються нові, більш складні задачі для утворення максимально комфортних, енергоефективних та універсальних видів МЕТ [2].

У великих містах, одним з найпоширеніших видів МЕТ є тролейбус. Це можна аргументувати тим, що:

1) По-перше, він економить бюджетні витрати. У порівнянні з маршрутними транспортними засобами на двигуні внутрішнього згорання (ДВС).

2) По-друге, тролейбуси комфортніші для водіїв та пасажирів. Влітку електротранспорт не нагріває салон двигуном, отже не виникає необхідність в додатковому охолодженні. Також вони значно тихіші у порівнянні з іншою

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

технікою і не збільшують рівень транспортного шуму в місті, який негативно впливає на здоров'я населення.

Найближчим часом в Україні почали звертати увагу на екологічні показники громадського транспорту та аналізувати стан навколишнього середовища, відповідно до досліджень на рис. 1.1 виділено три основних чинника занедбаності довкілля. [3]



Рис. 1.1 Недоліки громадського електротранспорту

## 1.2 Порівняння транспорту з двигуном внутрішнього згорання та електродвигуном

З точки зору правил ЕЕК ООН №100, електробус являється акумуляторним електричним транспортним засобом, тобто ТЗ, джерелом для якого є тільки електродвигун, тягову енергію якого забезпечує виключно установлений в цьому ТЗ тягова батарея.

Основні переваги електробусів:

- відсутність шкідливих вихлопів, які являються одним із головних джерел забруднення довкілля;

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- можливість зарядки акумуляторів від електричної мережі;
- більш високий ККД тягового приводу, у порівнянні з ДВЗ звичайних автобусів;
- менший рівень шуму.

На рис. 1.2 зображені основні переваги електробусів в містах. [3]

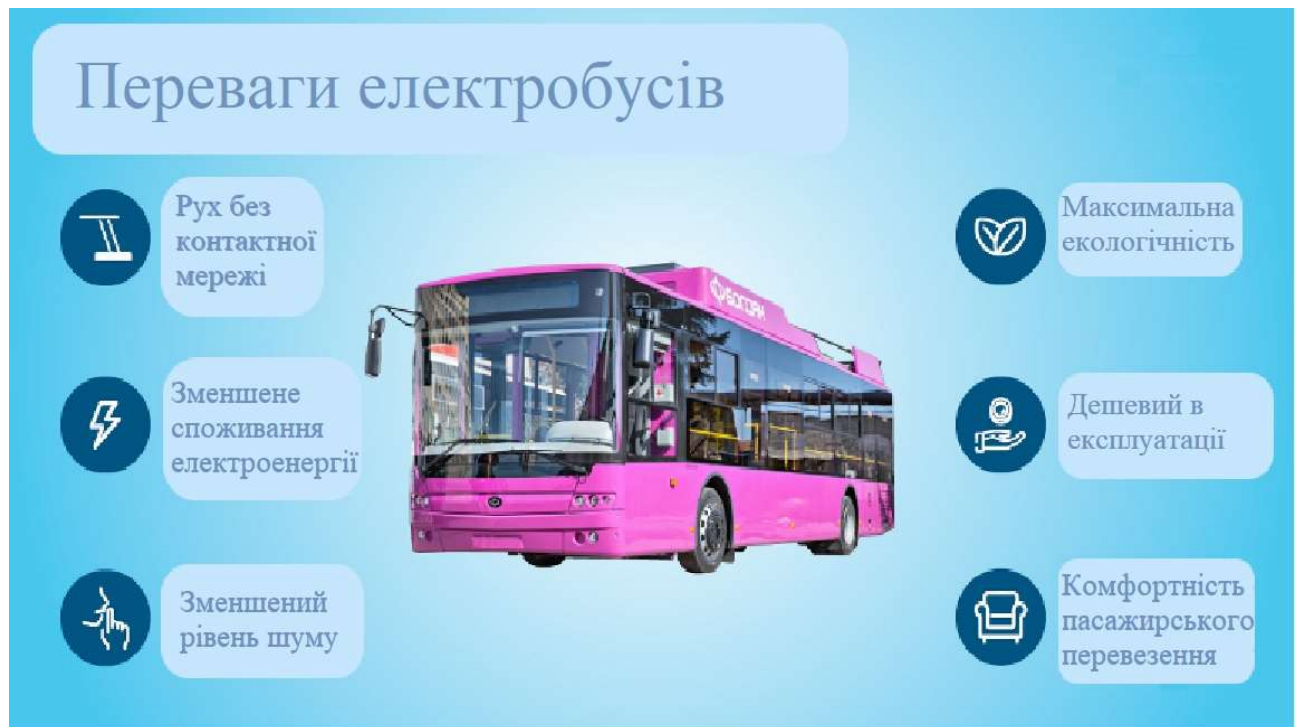


Рис. 1.2 Переваги електробусів

При всіх цих перевагах електробуси мають і ряд недоліків:

- акумулятори мають обмежену ємність і забезпечують менший запас ходу у порівнянні з автобусами з ДВЗ;
- велика вартість;
- маса електробуса на 12-15 % більше, ніж у автобусів з ДВЗ аналогічної вартості;
- відсутність відповідної інфраструктури персоналу для проведення техобслуговування.

Найважливішим експлуатаційним показником електробуса, який визначає ефективність його використання для пасажиро перевезень наряду з пасажиро місткістю, є запас автономності ходу, який напряму пов'язаний з ємністю

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тягової батареї. На сьогоднішній день на прикладі конструкцій дослідних зразків електробусів вітчизняних і закордонних виробників (див. таблиця 1.1) чітко помітна тенденція забезпечення автономного ходу електробуса на рівні денного пробігу, який наприклад складає 100-150 км для великих міст. В таблиця 1.1 показані характеристики електробусів та тролейбусів із запасом автономного ходу [4].

Таблиця 1.1

Основні характеристики електробусів і тролейбусів із запасом автономного ходу

Тип автобуса, країна, виробник	Повна маса, т	Ємність А·ч	Напруга на батареях, В	Запас автономного ходу, км	Запас енергії на 1 км ходу, кВт·ч
Електробус ЛІАЗ 6274, Росія	18,2	700	400	200	1,4
Електробус більшого класу ТРОЛЗА-52501, Россия	17,62	700	400	120	2,33
Електробус меншого класу КАМАЗ 2257Э, Росія	6	Енергоемність 35,3 кВт·ч	69	0,51	
BYD eBus, Китай	19	Енергоемність 324 кВт·ч	250	1,3	
Електробус Proterra catalyst vehicle, США	39	Енергоемність 321 кВт·ч	290	1,11	
Електробус Vozankaya-TCV Sileo E-Bus	18	Енергоемність 200 кВт·ч	200	1,0	

Тому на різних етапах проектування електробуса акцентують увагу на вибір основних характеристик тягової батареї і, насамперед, їх ємності. Це пов'язано з тим, що використовувані на сучасних електробусах батареї мають високу вартість, інколи вони складає 50% від собівартості електробуса, значну

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

масу та об'єм. З однієї сторони, ємність тягової батареї повинна бути достатньою для забезпечення денного пробігу електробуса, а з іншої не повинна бути занадто великою для оптимальної вартості та пасажиро місткості [5].

### 1.3 Основні вимоги до тягового електрообладнання

Електродвигуни, системи керування і джерела живлення складають тягове електрообладнання електротранспорту. Вимоги до електрообладнання визначаються вимогами умов його роботи. На відміну від електрообладнання на стаціонарних установках, в електротранспорті воно працює при більш складних умовах і характеризується наступним: [1] [6].

1. Внаслідок нерівностей дороги, а також коливань і вібрацій механічних частин електротранспорту, електрообладнання працює при частих ударних зіткненнях і трясці.

2. При русі електротранспорту в електрообладнання потрапляє забруднене і вологе повітря, іноді бруд, вода, сніг. Тому ізоляційні матеріали та ізоляційні деталі повинні мати вологозахисту ізоляцію, а всі металічні деталі – надійно антикорозійне покриття.

3. Номінальна напруга в міському електротранспорті зазвичай вища, ніж в промислових установках. Це підвищує вимоги до комутаційної надійності тягових електродвигунів.

4. Електричний транспорт працює з різко змінним навантаженням на різних шляхах; параметри повітря (вологість і температура), охолоджуючого електрообладнання, змінюються в широких межах, що приводить до значних змін температури обмоток і струмопровідних частин електрообладнання. Тягові електродвигуни і електрична апаратура повинні надійно працювати при найгірших поєднаннях температури обмоток і напруги в бортовій мережі.

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Простір для розміщення і монтажу електрообладнання на електротранспорті доволі обмежено, тому тягове електрообладнання повинно мати по можливості якомога менші габарити та вагу.

Окрім тролейбусів існують також повністю автономні автобуси, так звані електробуси. Вони мають велику перспективу на сьогоднішній день, оскільки вони рухаються виключно від акумуляторних батарей, заряду якого їм вистачає на цілий день але сучасні літієві батареї, які використовуються в сучасних транспортних засобах беруть на себе основну частину вартості транспортного засобу, оскільки являються найдорожчим його елементом [1].

Основні переваги переходу на міський електротранспорт показані на рис. 1.3. [3]



Рис. 1.3 Переваги переходу на міський електротранспорт

Під час розгону транспортний засіб витрачає найбільшу кількість енергії, і в даному випадку акумулятор виконує роль балансування енергії. [7] В роботі буде продемонстрований принцип обмеження прискорення, завдяки якому можна зберегти більше енергії в акумуляторі. Також такий спосіб дозволить

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

зменшити вартість електробуса майже не впливаючи на його динамічні показники.

При гальмуванні електробуса двигуном, виникає явище рекуперації енергії. Воно заключається в тому, що енергія, яка отримується від двигуна, повертається до джерела живлення. Таким чином буде відбуватися економія ресурсів електромережі.

#### 1.4 Порівняння типів акумуляторів

Характеристики акумуляторної батареї (АБ) залежать від хімічного складу компонентів, але, не дивлячись на те, необхідний еквівалентний вибір основних характеристик для тягової акумуляторної батареї, так як саме вони впливають на якість і строк служби тягового джерела в цілому. В таблиця 1.2 наведені основні характеристики, на які необхідно орієнтуватися при виборі найбільш ефективного типу акумуляторних батарей [8].

Таблиця 1.2

Кількісне порівняння типів акумуляторних батарей

Параметри/тип АКБ	Свинцево-кислотні	Нікель-кадмієві	Нікель-метал-гідридні	Літій-іонні
Номінальна напруга АБ, В	2	1.2	1.2	3.7
Питома енергоємність Вт*год/кг	30-40	40-60	30-80	90-140
Питома потужність Вт/кг	180	150	150-1000	1800
Середній час заряджання, час	Більше 10	8	6	2
Кількість циклів заряду/розряду (строк служби)	500-800	2000	800	2000
Середній саморозряд за місяць, %	4	20	30	7
Середня вартість за кВт*год, долар	150	400-800	250	450

При виборі типу акумуляторів для електробусу необхідно дивитися на окремі фактори, які в сукупності із зарядними характеристиками, строком служби і тяговими показниками повинні становити параметри ТДС (тягового джерела струму).

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

І були обрані наступні характеристики:

- компактність – порівнювальна характеристика, яка визначає масо габаритні властивості;
- швидкий процес заряду – можливість батареї заряджатися максимальними струмами;
- простота утилізації – складності технологічного процесу, пов’язана з утилізацією або можливостями відновлення корисних хімічних властивостей елементів;
- ефект пам’яті – здатність відновлення ємності акумулятора при порушенні рекомендованих режимів заряду, в тому ж числі при підзарядці не повністю розрядившогося акумулятора;
- Допустимий перезаряд – кількісний показник, який визначає допустиме значення при заряді акумулятора вище 100%;
- Глибина розряду – реальна кількість (від заявленої) енергії, яку акумуляторна батарея зможе віддати без збільшення температури.

Проаналізувавши характеристики різних видів акумуляторів, вибір припав на літєві елементи, які мають найбільшу питому потужність, питому енергоємність, відносно невеликий саморозряд та невеликий час заряджання.

Літєві джерела струму можна розділити на декілька типів, згідно з використовуваними матеріалами при їх виготовленні. [9]

Технології літій-іонних акумуляторів, виготовлення катодів яких базується на використанні кобальту, нікелю, марганцю або алюмінію, як правило, відповідає номінальному значенню напруги акумулятора. Однак у відношенні питомих характеристик, строк служби і робочої температури, при використанні різних технологій показують себе по-різному [9].

Важливою властивістю ЛІА (літій-іонний акумулятор) – малий час заряду, який може досягати в деяких випадках 2-3 годин. Розробники рекомендують заряджати струмом в 0,1С ємності акумулятора або меншою, з ціллю продовження служби батареї. В такому випадку ефективність заряду складе приблизно 99%, а зміна температурних режимів під час заряду

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



знаходитися в допустимому діапазоні. Деякі ЛПА можуть витримувати підвищення температури на 5°C при досягненні повного заряду. Це може бути пов'язано із захисною схемою або підвищеному внутрішньому опору. Повний заряд проходить коли батарея досягає порогової напруги і струм зменшується до трьох відсотків від свого номінального значення.

ЛПА не повинні бути повністю заряджені, як у випадку із СКА (свинцево-кислотним акумулятором). Рекомендується не допускати повного заряду АБ тому, що висока напруга викликає розбалансування батареї. Вибір нижнього порогу напруги або повне відімкнення заряду насичення продовжує строк служби батареї, однак знижує час автономної роботи [10].

Іншою важливою характеристикою ЛПА є робота в безпечному режимі в межах обмеженого діапазону робочих напруг. Довга підтримка заряду вище нормованого утворює покриття із металевого літію на аноді, в той час, як матеріал катода становиться окислюючим елементом і втрачає стабільність, що утворює задовільні умови для утворення вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>). Тиск в акумуляторі в цьому випадку підвищується і якщо заряд продовжується при цих самих умовах, спрацьовує захисний пристрій, який відповідає за безпечну експлуатацію батареї. Якщо тиск продовжує зростати, то мембрана розривається і в результаті може відбутися само підпал акумулятора. Критичні температури ЛПА для повністю заряджених акумуляторів визначають в залежності від використаних технологій: для кобальту 130-150°C, нікель-марганець-кобальт 170- 180°C, і марганцю 250°C. ЛПА являється не єдиним акумулятором, який вимагає відповідного відношення і організації допустимих умов експлуатації, з метою підвищення техніки безпеки.

Розподіл якісних показників показано в таблиці 1.3

В результаті проведеного аналізу по зарядним характеристикам, кількісному та якісному порівнянню показників акумуляторів чотирьох різних видів, вибір ЛПА в якості тягових, обумовлений наступними властивостями і показниками [11]:

- високий показник питомих характеристик;

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

- високе значення допустимих зарядних і розрядних струмів;
- можливість швидкого заряду;
- відсутність необхідного обслуговування;
- максимальний строк служби;
- низькі показники саморозряду;
- відсутність ефекту пам'яті.

Таблиця 1.3

Якісне порівняння акумуляторних батарей

	Свинцево-кислотні	Нікель-кадмієві	Нікель-метал-гідридні	Літій-іонні
Компактність	-	+	+	+
Швидкий процес заряду	-	+	+	+
Простота утилізації	-	-	+	+
Строк збереження більше 3 років	+	+	-	+
Ефект пам'яті	-	+	+	-
Допустимий перезаряд	Високий	Середній	Низький	Дуже низький
Глибина розряду	50%	50-80%	50-85%	80%
Періодичність обслуговування	3-6 місяців	30-60 днів	60-90 днів	Не регламентується

Єдиним недоліком якості ЛПА на сьогоднішній день є їх висока вартість, але на сьогоднішній день вчені вже розробили твердо тільні літієві акумулятори, які дадуть змогу в майбутньому зменшити час заряджання, підвищити ємність та зменшити вагу цих батарей в десятки разів.

## 1.5 Способи транспортування електроенергії від мережі до тягової системи транспортного засобу

Сучасні технології стрімко розвиваються і вчені постійно розробляють нові способи заряджання електротранспорту. В загальному випадку

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електротранспорт за методом заряджання можна класифікувати на контактний, які мають контактні площадки, пантограф або тролєї (рис. 1.4 та рис. 1.5) і безконтактний, які заряджаються бездротовими способами (рис. 1.6 і рис. 1.7).  
[12]



Рис. 1.4 Заряджання електробуса під час руху через тролєї

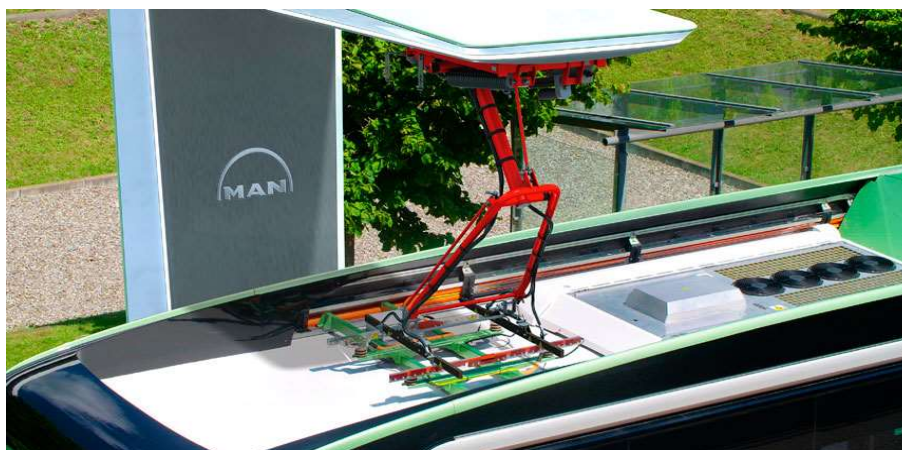


Рис. 1.5 Заряджання електробуса на зупинці громадського транспорту через пантограф.

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

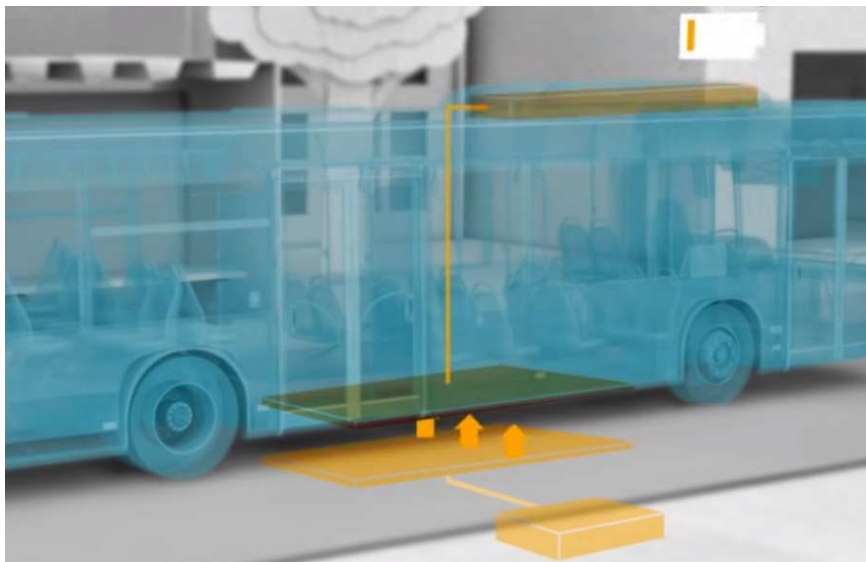


Рис. 1.6 Бездротове заряджання електробуса

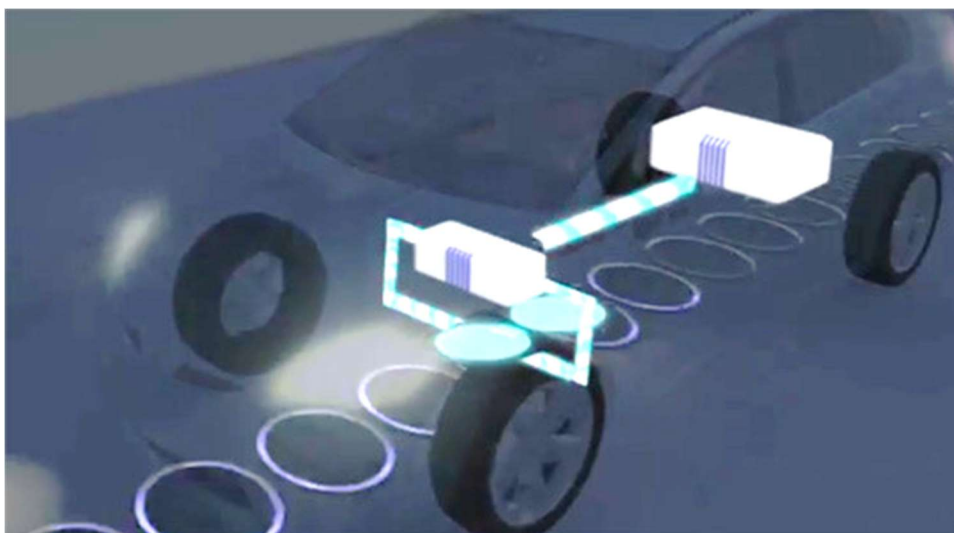


Рис. 1.7 Бездротовий динамічний спосіб заряджання електробуса

Контактний спосіб заряджання мають всі тролейбуси, такий спосіб заряджання не оптимізований під електробуси, тому їх заряджають або на кінцевих станціях (в Депо) або на зупинках громадського транспорту, під час посадки/висадки пасажирів, а бездротовий спосіб можна класифікувати на динамічний та статичний (див. рис. 1.8) [5].



Рис. 1.8 Способи заряджання електробуса

Статичний спосіб полягає в тому, що для заряджання електробуса потрібно заїхати на спеціальну площадку, яка може бути реалізована в будь-якому місці, наприклад на зупинці громадського транспорту, де й починається процес заряджання акумуляторної батареї.

А динамічний спосіб представляє собою бездротове заряджання електробуса на протязі всього (або майже всього) шляху, для цього потрібно щоб цей маршрут, за яким рухається електротранспорт, був обладнаний вмонтованими в дорожнє покриття зарядними пристроями, які під час руху дозволять безперешкодно заряджати батарею електробуса в русі.

З рис. 1.8 можна побачити, що контактний і безконтактний спосіб доцільно реалізовувати на зупинках громадського транспорту, так як це місце є більш універсальним для майбутньої реалізації швидкого заряджання електробусів у великих містах з розвиненою інфраструктурою [13].

Але для початку простішим в реалізації буде спосіб заряджання через тролєї, який використовують сучасні тролейбуси. Цей спосіб потребує мінімум затрат на його реалізацію, так як в містах вже на більшості доріг встановлені ці

контактні лінії, що мінімізує час, за який буде проводитися нововведення такого транспорту.

## **1.6 Основні методи зарядки**

### **Постійна напруга**

Зарядний пристрій постійної напруги – це в основному джерело постійної напруги, який у найпростішій формі може складатися з трансформатора з випрямлячем для забезпечення постійного значення напруги для зарядки акумулятора. На рис. 1.9 продемонстрований спосіб заряджання постійною напругою (2 етап). Зарядні пристрої постійної напруги зазвичай використовують для автомобільних акумуляторів і резервних енергосистем. Крім того літій-іонні елементи часто використовують системи заряджання постійною напругою, хоча зазвичай вони є більш складними і мають додаткову схему захисту.

### **Постійний струм**

Зарядні пристрої постійного струму змінюють напругу, яку вони прикладають для заряджання акумулятора, щоб підтримувати постійний струм. Цей спосіб вимикається, коли напруга досягає рівня повного заряду (див рис. 1.9, 1 етап). Ця конструкція зазвичай використовується для нікель-кадмієвих і нікель-металевих гідридних елементів або батарей.

### **Зарядка IU**

Це один із найрозповсюдженіших методів заряджання акумуляторів, його найбільш доцільно використовувати для довготривалого терміну експлуатації батарей. При підключенні акумулятора, відбувається заряджання постійним струмом, доки напруга не досягає заданого значення, потім відбувається перехід до заряджання постійною напругою [14]. На рис. 1.9 продемонстрований спосіб заряджання IU, який складається з совокупності

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

двох етапів заряджання. Для підтримування акумулятора в буферному режимі цей метод виконує заряджання акумулятора, витримуючи деякі паузи, при яких акумулятор, за рахунок струмів саморозряду, досягає дещо нижчого значення напруги, ніж максимально допустима. [15]



Рис. 1.9 Заряджання акумулятора: 1 етап – постійним струмом; 2 етап – постійною напругою

### Імпульсна зарядка

Імпульсні зарядні пристрої подають струм заряду на батарею в імпульсах. Частоту зарядки (на основі середнього струму) можна точно контролювати шляхом зміни ширини імпульсів. Під час процесу зарядки короткі періоди спокою від 20 до 30 мілісекунд, між імпульсами, дозволяють хімічним діям в батареї стабілізуватися шляхом розподілу реакції по всьому об'єму електрода перед повторним запуском заряду. Це дає можливість хімічній реакції встигати за швидкістю введення електричної енергії. На рис. 1.10 наглядно зображено імпульсне заряджання акумулятора. Також стверджується, що цей спосіб може зменшити небажані хімічні реакції на поверхні електрода, такі як утворення газу, збільшення кристалів і пасивація.

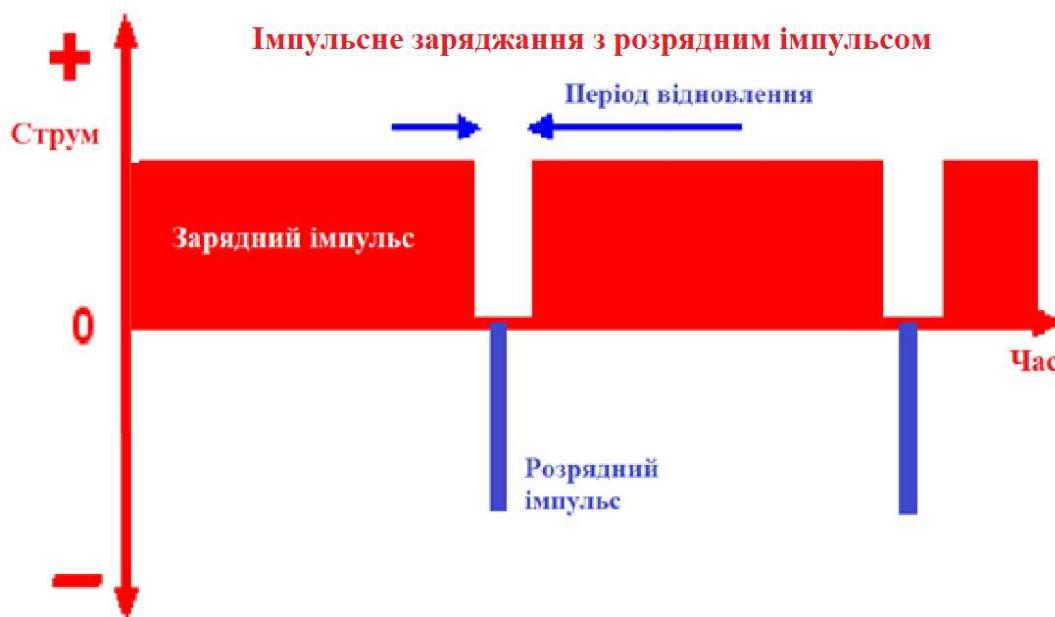


Рис. 1.10 Імпульсне заряджання з розрядним імпульсом

### Заряджання з негативними імпульсами

Інша назва: Рефлексна або зарядка розривом. Використовується разом з імпульсною зарядкою (див рис. 1.10), вона застосовується дуже короткий імпульс розряду, як правило від 2 до 3 разів меншим за значення зарядного струму протягом 5 мілісекунд, під час періоду зарядки для деполяризації комірки. Ці імпульси зміщують будь-які газові бульбашки, які накопичувалися на електродах під час швидкої зарядки, прискорюючи процес стабілізації і, отже, загальний процес зарядки. Вивільнення і дифузія газових бульбашок відомо як «відрижка». Були зроблені суперечливі твердження щодо поліпшення як швидкості заряду, так і терміну служби батареї, а також для видалення дендритів, можливо завдяки цій техніці. Найменше, що можна сказати, що «це не пошкодить акумулятор».

### Trickle charge (або буферний режим)

Це режим, при якому акумулятор і навантаження майже весь час під'єднані паралельно до джерела і тримаються при постійній напрузі, нижчій максимальної напруги акумулятора.



Швидкість заряду змінюється залежно від швидкості саморозряду, таким чином батареї залишаються повністю зарядженими.

Найчастіше використовується для систем аварійного живлення, коли відмикається живлення від мережі. [16].

Для цього методу потрібно використовувати розумний зарядний пристрій, який буде працювати наступним чином: спочатку при досягненні певного значення напруги, вона вимірювала б значення холостого ходу акумулятора витримуючи деяку паузу і на основі цього прийняла б рішення про свої подальші дії. Чим більш наближене значення напруги холостого ходу акумулятора до повністю зарядженого рівня, тим більш короткі імпульси зарядного струму видаватиме зарядний пристрій. Як тільки досягне заданого порогу напруги, імпульси струму припиняться. Цей принцип продемонстрований на рис. 1.11.

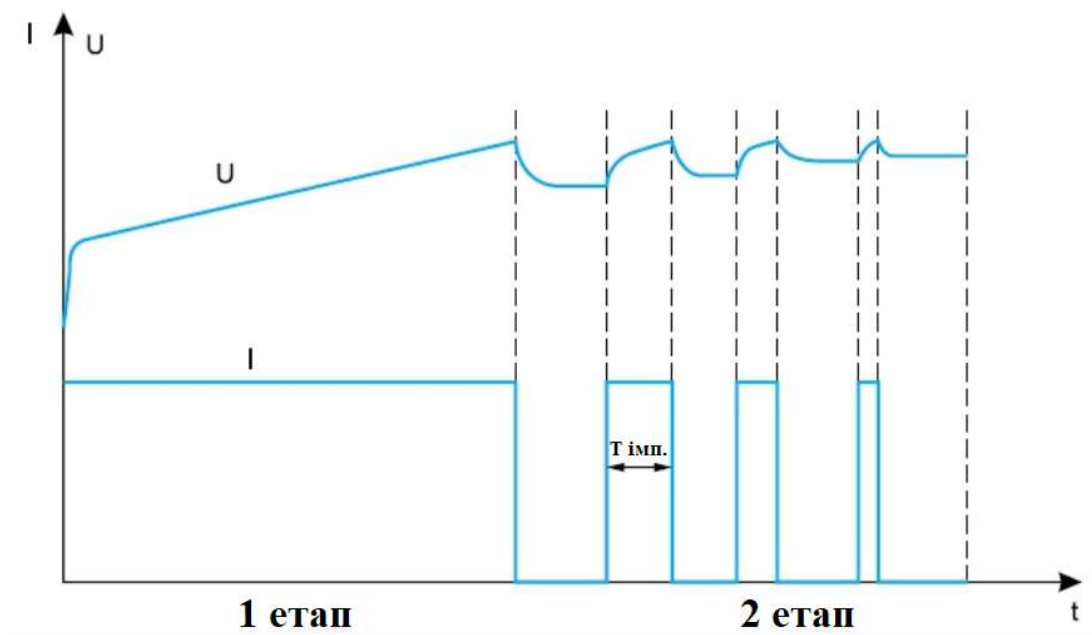


Рис. 1.11 Заряджання імпульсами струму

## 1.7. Принцип заряджання високовольтного акумулятора пропонуваного транспортного засобу

Без розвиненої інфраструктури електробус втрачає багато своїх переваг і перетворюється в проблему. Заряджати електробус можна трьома різними способами: довгою нічною зарядкою, підзаряджання під час руху по заданому маршруту, зарядкою на кінцевих станціях і швидкою зарядкою на зупинках громадського транспорту (див. рис. 1.8).

Під час швидкої зарядки можна передавати електричну енергію в батарею швидше, ніж на це реагуватимуть хімічні процеси в акумуляторі, тим самим пошкоджуючи його. Тому використання дуже потужних зарядних станцій до 600 кіловат не буде оптимальним рішенням для заряджання акумуляторів великої ємності.

При розгляданні цього питання буде доцільним брати електробуси із акумуляторами незначної ємності та звернути увагу що використання зарядних станцій на зупинках громадського транспорту є кращим варіантом, ніж заряджання електробусу на кінцевих зупинках. Сучасні види заряджання електробусів, які використовуються в світі, мають певну платформу, яка встановлюється в верхній частині зупинки ТЗ, коли електробус під'їжджає, він торкається до її пантографом та починається процес заряджання акумулятора. При умові, що це буде не звичайні літєві акумулятори, а наприклад, суперконденсаторна батарея, то час заряджання такої батареї складають десятки секунд. Але всім відомо, що суперконденсатори можуть зберігати лише 5% енергії у порівнянні з літій-іонними батареями схожого об'єму. Очевидно, що на одному заряді конденсатора автобус проїде не велику відстань, а це означає, що про будь-яку автономність говорити не доводиться. Але позитивна властивість суперконденсаторів – швидкість зарядки. На відновлення заряду уходять секунди. Крім того до 80% енергії гальмування перетворюється в електричну енергію і повертається назад до батареї, це дає можливість

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

економити до 50% запасів енергії і не починати заряджання акумулятора із глибоко розрядженого стану. [7]

Враховуючи сучасні літєві акумуляторні батареї, які спроможні відновити більшу частину заряду за десятки хвилин, та зберігати накопичену ними енергію тривалий час, з'являється можливість використовувати більш сучасні модифікації, розроблені компанією Samsung, методом нанесення на електроди акумуляторів графенові кульки. Разом зі швидкістю заряджання і ємність самого акумулятора збільшиться вдвічі. А з часом можливо повністю перейти на більш безпечний та енергоефективний метод зберігання енергії на графенових акумуляторах.

Довга нічна зарядка використовується лише в парі з попередньо вказаними видами підзарядки електробусів. Заряджати електробус один раз на весь маршрут неможливо по об'єктивним причинам. По-перше, для роботи хоча б на протязі половини дня повинні бути громіздкі акумуляторні батареї, які займуть багато місця в салоні – ця обставина різко збільшить вартість кожного електробуса, збільшить масогабаритні показники самого транспортного засобу, що потягне за собою великі втрати енергії на переміщення самого ТЗ та збільшить вартість і час обслуговування таких батарей. По-друге, до автобусних парків потрібно буде проводити дуже потужні лінії електропостачання, щоб одночасно жити сотні таких транспортних засобів.

В будь-яких електричних системах, або приладах є омічні втрати: частина електроенергії перетворюється в тепло і не виконує корисну роботу. Чим більша напруга електросистеми, тим (при тій же потужності) менший струм, менше омічних втрат і менша ціна самої системи. Тобто використання високовольтного акумулятора для потужних систем має виграш по корисно використаній потужності у порівнянні з низьковольтними акумуляторами. Відповідно метою використання акумуляторних батарей з послідовним з'єднанням акумуляторів – зменшення втрат і збільшення коефіцієнту корисної дії (ККД).

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Іноді ємності одного акумулятора не вистачає, і її потрібно збільшити. Тоді більш доцільно замість використання одиничних акумуляторів великої ємності використовувати паралельне з'єднання таких самих елементів, щоб їх сумарна ємність подвоїлась.

Отже маємо задачу розробити систему акумуляування транспортного засобу, яка буде розрахована для заряджання високовольтного акумулятора та виконувати роль балансування енергії в самому електробусі.

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 РОЗРАХУНОК СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

### 2.1. Схема електрична структурна електробуса

На рис. 2.1 наведена структурна схема електробуса. Головною особливістю цієї схеми є те, що зарядний пристрій виконує роль як заряджання високовольтного акумулятора, так і балансування енергії, яку відбирає тягова система від акумулятора. Використання високовольтного акумулятора дозволяє виконувати швидке заряджання акумуляторної батареї та балансування енергії при динамічних змінах різних сил, які впливають на рух електробуса.

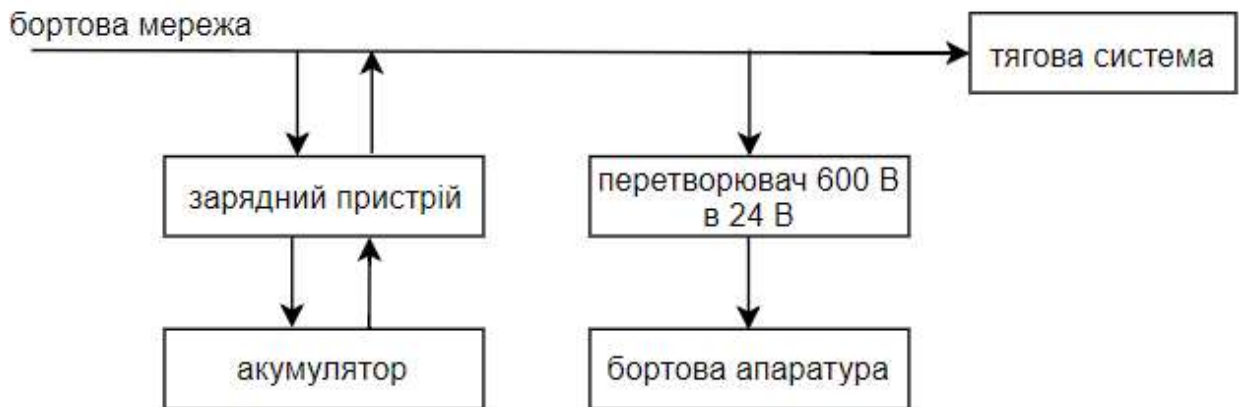


Рис. 2.1 Структурна схема електробуса

На схемі видно, що акумулятор з'єднаний з тяговою системою через зарядний пристрій. Ця особливість схеми дає змогу без додаткового обладнання контролювати як заряджання даного акумулятора, так і режим його розряджання, що спрощує, в подальшому, питання конструкції та заряджання цього елемента.

### 2.1 Схема електрична принципова

На рис. 2.2 показана принципова схема запропонованого зарядного пристрою.

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26



ДС51.510202.001.ПЗ

режимах, для використання використовуються драйвери верхнього і нижнього ключа DA1 і DA2 для керування інвертором напруги та напівмостовий драйвер DA7 для керування силовою частиною зарядного пристрою. Для живлення МК та драйверів використовується готова збірка понижуючого перетворювача на базі мікросхеми LM317, який забезпечить перетворення напруги з 24 В до заданої напруги живлення 15 В та 5 В для драйвера та МК відповідно.

## 2.2 Принципова схема силової частини зарядного пристрою

Для заряджання та балансування енергії була запропонована схема, яка б працювала в двох режимах роботи і була спроможна понизити напругу, яка буде передаватися від бортової мережі до акумулятора та збільшити її при необхідності передачі від акумулятора до тягової системи відповідно до структурної схеми, яка зображена на рис. 2.1. [18]. Принципова схема зарядного пристрою показана на рис. 2.3

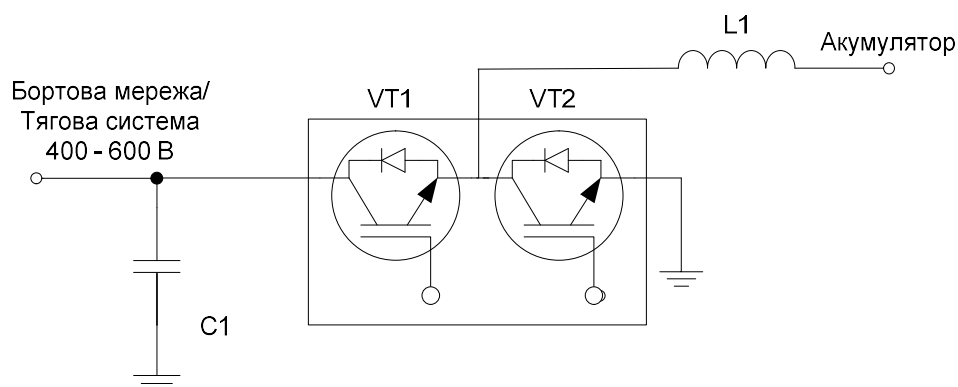


Рис. 2.3 Принципова схема силової частини зарядного пристрою (перетворювача)

Особливістю цієї схеми є те, що вона включає в себе одночасно підвищуючий та понижуючий перетворювачі і має паралельне підключення акумулятора відносно електромережі. Вона включає в себе конденсатор C1 який використовується в ролі фільтра, щоб згладити зміну складову напруги від бортової мережі, транзисторні модулі IGBT із вбудованими зворотними діодами та котушка L1 для забезпечення режиму роботи підвищуючого перетворювача.

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Розроблена схема працює в двох режимах.

Перший режим: Понижуючий перетворювач.

Другий режим: Підвищуючий перетворювач.

Принцип роботи цієї схеми можна пояснити наступним чином: в першому режимі роботи, коли електробус рухається від бортової мережі (400 – 600 В) в схемі, починає працювати понижуючий перетворювач, який перетворює напругу бортової мережі в напругу достатнього рівня, яка потрібна для заряджання акумулятора (приблизно 400 В). Для пониження напруги в схемі використовується транзисторний модуль VT1. При відкритому стані транзистора струм протікає за напрямком: «бортова мережа» – VT1 – L1 – «акумулятор», коли транзистор закритий, струм в схемі протікає через діод транзистора VT1 у зворотному напрямку. Часові діаграми понижуючого перетворювача в режимі неперервного струму наведені на рис. 2.4.

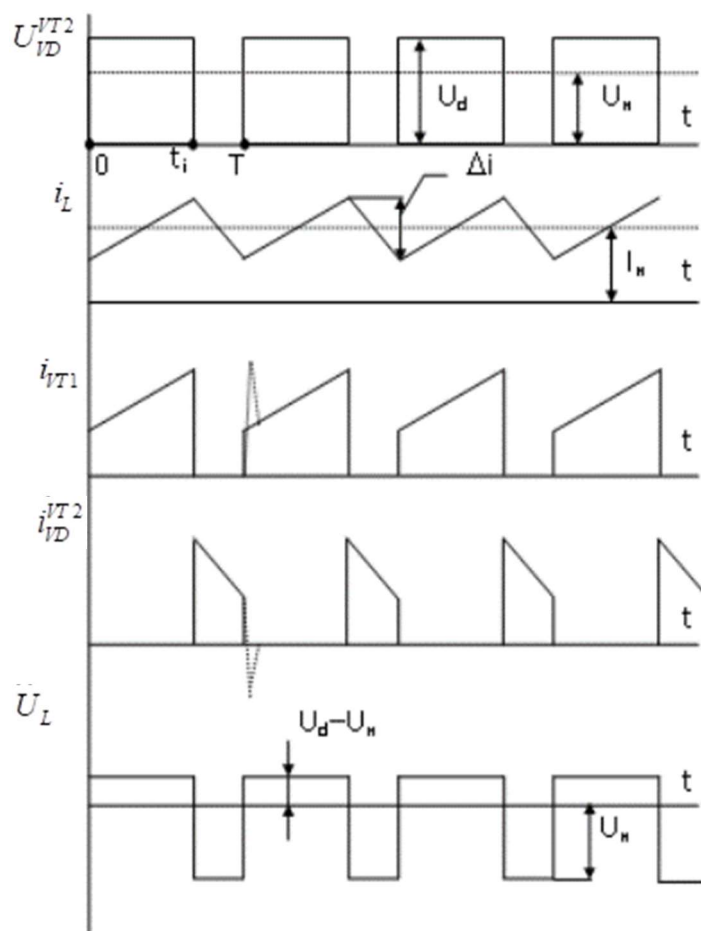


Рис. 2.4 Часові діаграми понижуючого перетворювача в режимі неперервного струму



У другому режимі дана схема працює, коли від'єднується бортова мережа і електробус використовує лише енергію від акумулятора. Цей режим потрібен для забезпечення необхідної напруги живлення для тягової системи, і працює в режимі підвищуючого перетворювача. Для підвищення напруги використовується транзистор VT2 та котушка індуктивності L1. В цьому режимі при відкритому транзисторі VT2 струм протікає за напрямком: «акумулятор» – L1 – VT2 – «земля». За допомогою ЕРС самоіндукції котушка індуктивності накопичує енергію. Потім транзистор VT2 закривається і котушка перетворюється в додаткове джерело напруги. Струм починає протікати за напрямком: «акумулятор» – L1 – діод транзистора VT1 – «тягова система», полярність напруги на котушці та акумуляторі співпадає і їхні напруги додаються, на виході отримуємо напругу вищого рівня. Часові діаграми підвищуючого перетворювача в режимі безперервного струму дроселя наведені на рис. 2.5.

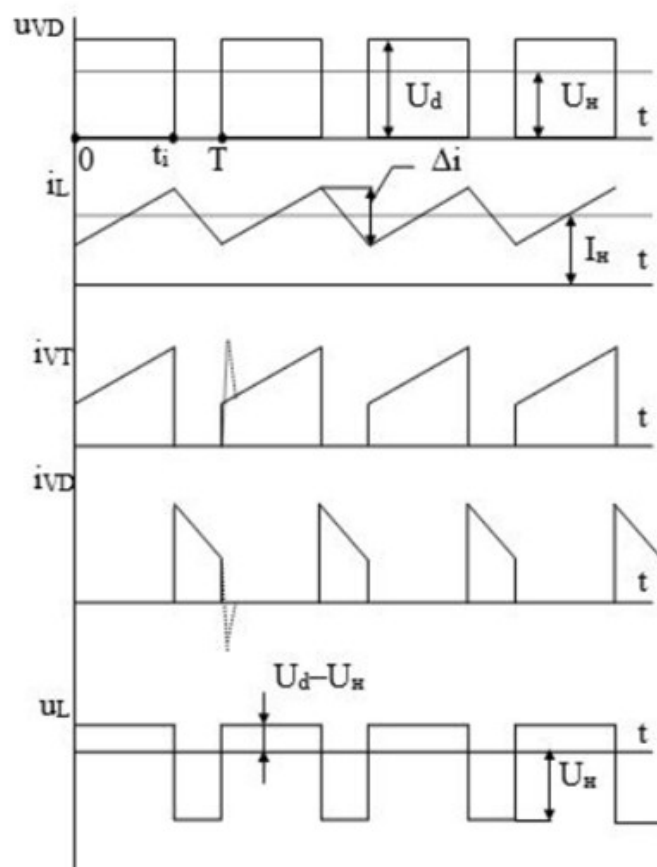


Рис. 2.5 Часові діаграми роботи підвищуючого перетворювача в режимі неперервного струму

Також необхідно врахувати можливість рекуперації енергії, в цьому режимі тягова система буде виконувати роль бортової мережі та схема працюватиме в першому режимі.

### 2.3 Принципова схема перетворювача 600 - 24 В

Схема перетворювача напруги бортової мережі до 24 В з інвертором напруги та двопівперіодним випрямлячем із нульовим виводом трансформатора була обрана керуючись збереженням максимального ККД перетворювача та якомога менших втрат на проміжних елементах схеми. Вона необхідна для живлення бортової апаратури від напруги 24 В, на яку розроблена сучасна апаратура в тролейбусах. [19]

На рис. 2.6 зображена принципова схема мостового інвертора напруги із двопівперіодним випрямлячем з нульовим виводом трансформатора.

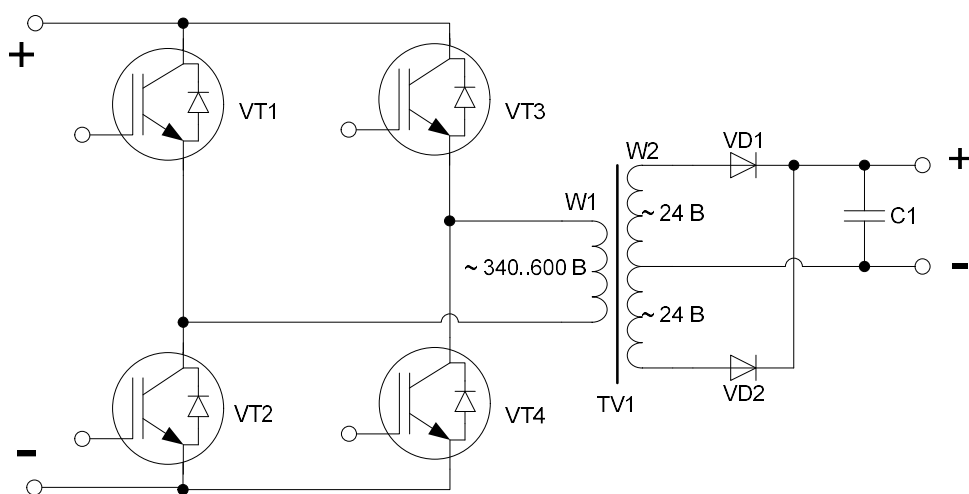


Рис. 2.6 Принципова схема мостового інвертора напруги із двопівперіодним випрямлячем з нульовим виводом

Інвертор напруги призначений для перетворення постійної напруги в змінну. Принцип його роботи можна описати наступним чином. При підключенні джерела живлення, у початковий момент часу, системою керування відкривається пара транзисторів VT1 і VT4. Через схему починає

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

проходити струм по колу: «+» - VT1 – W1 - VT4 – «-». Потім транзистори VT1 і VT4 закриваються, після них відкривається інша пара транзисторів VT2 і VT3 і струм починає протікати по колу: «+» - VT3 – W1 – VT2 – «-». Відповідно через первинну обмотку W1 трансформатора TV1 спочатку струм протікає в одному напрямку, а потім в іншому, таким чином створюється змінна напруга, яка має форму прямокутних імпульсів. Для уникнення короткого замикання в мостовій схемі інвертора, коли одночасно будуть ввімкнені транзистори VT1 і VT2 або VT3 і VT4, використовують затримку імпульсів керування транзисторами. На

рис. 2.7 продемонстровані часові діаграми роботи мостового інвертора напруги.

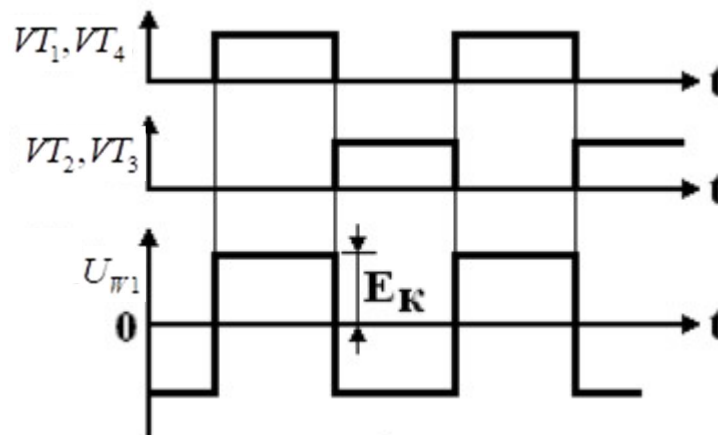


Рис. 2.7 Часові діаграми роботи мостового інвертора напруги

Також в цій схемі використовується двопівперіодний випрямляч з нульовим виводом трансформатора для перетворення змінної напруги в постійну пульсуючу. Таку напругу необхідно згладити [20]. Для цього на виході схеми ставимо вихідний конденсатор C1, який погасить пульсації.

У порівнянні з мостовою схемою, випрямляч з нульовим виводом, має вдвічі менше діодів, що веде до зменшення втрат потужності на діодах. Як результат - відбувається додаткова економія на електронних компонентах в схемі.

## 2.4 Опис режимів руху транспортного засобу

Для того, щоб порахувати параметри системи акумулювання, потрібно розрахувати енергію, яку витрачає електробус для здійснення руху між зупинками та визначити значення потужності, яку витрачає електробус на протязі всього маршруту.

Ємність акумулятора розраховується з урахуванням того, що транспортний засіб підзаряджається при русі між зупинками.

Сила, яка необхідна для руху ТЗ розкладаємо на такі складові, як сила опору повітря, сила опору розгону, сила опору підйому, сила опору кочення та сила інерції. [7]

### Сила опору повітря

Для визначення сили опору повітря на практиці знайшла застосування емпірична формула, яка має діапазон швидкостей руху для реального автомобіля, оскільки всі складові опору повітря важко визначити в аналітичному вигляді, тому формула має наступний вигляд:

$$F_{\text{Пов}} = 0,5 \cdot c_x \cdot A \cdot \rho_{\text{Пов}} \cdot V^2. \quad (2.1)$$

де  $c_x$  - безрозмірний коефіцієнт обтікання повітрям, який залежить від форми тіла,  $\rho_{\text{Пов}}$  - густина повітря,  $\rho_{\text{Пов}} = 1,202..1,225 \text{ кг} / \text{м}^3$ ,  $A$  - площа Міделева зрізу ( площа поперечної проекції) автомобіля  $\text{м}^2$ ,  $V$  - швидкість автомобіля,  $\text{м/с}$ .

### Сила опору підйому

Силу опору підйому знаходять за наступним виразом:

$$F_{\text{П}} = G_a \cdot \sin(\alpha). \quad (2.2)$$

де  $G_a$  - маса ТЗ;  $\alpha$  - кут нахилу дорожнього полотна.

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На практиці величину похилу зазвичай оцінюють величиною підйому дорожнього полотна, яке відноситься до величини горизонтальної проекції дороги і позначають  $i$ , висловлюючи отримане значення в процентах. При відносно невеликій величині нахилу полотна, яке допускається в розрахункових формулах при визначенні сили опору підйому використовують не  $\sin(\alpha)$ , а величину  $i$  у відносних значеннях. При великих значеннях величини нахилу заміна  $\sin(\alpha)$  величиною  $i$  неприпустима.

### Сила опору кочення

Опір коченню залежить від маси автомобіля і коефіцієнта тертя кочення. Маса автомобіля при цьому надає першорядний вплив на величину опору коченню. Велика маса проявляється несприятливо в будь-якому випадку, якщо ми прагнемо до економії енергії, то зменшення маси автомобіля є однією з першорядних завдань.

Маса проявляється у вигляді сили, що притискує автомобіль до землі. Пересуванню перешкоджає сила, яка залежить від коефіцієнта тертя кочення між автомобілем і поверхнею дороги. Тут є можливість економити певну енергію. Сила опору коченню автомобіля  $F_K$  розраховується за формулою

$$F_K = G_a \cdot f. \quad (2.3)$$

де  $G_a$  - маса ТЗ;  $f$  - коефіцієнт тертя кочення.

### Сила опору інерції

Формула для розрахунку сили інерції має наступний вид:

$$F_I = m_E \cdot a. \quad (2.4)$$

де  $m_E$  - ефективна маса;  $a$  - прискорення.

Але в цьому випадку для розрахунку сили інерції використовується деяка ефективна маса, яку можна розрахувати використовуючи метод Н. Е. Жуковського, прирівнюючи кінетичну енергію автомобіля, що рухається поступально, в еквівалентній масі сумі енергій за формулою:

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

$$\frac{m_E V^2}{2} = \frac{m_a V^2}{2} + \frac{J_{\partial} \omega_{\partial}^2}{2} + \frac{J_K \omega_K^2}{2}. \quad (2.5)$$

де  $J_{\partial}$  – момент інерції маховика двигуна і зв'язаних з ним деталей ( $\text{Н} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}$ );  $\omega_{\partial}$  – кутова швидкість двигуна ( $\text{рад/с}$ );  $J_K$  – момент інерції одного колеса;  $\omega_K$  – кутова швидкість колеса.

### Сумарна сила

Сумарна сила, іншими словами сила тяги, саме ця сила необхідна для подолання сил опору, які діють на ТЗ.

$$F_{\Sigma} = F_K + F_{\Pi} + F_{\text{Пов}} + F_I. \quad (2.6)$$

де  $F_K, F_{\Pi}, F_{\text{Пов}}, F_I$  – сила опору коченню коліс, підйому, повітря, інерції відповідно.

Розрахунок сумарної сили проводиться з метою розрахунку енергії для подолання транспортним засобом деякої ділянки дорожнього полотна. В подальшому із цих розрахунків будуть визначатися параметри зарядного пристрою та акумулятора.

## 2.5 Розрахунок сил, які діють на транспортний засіб

### Сила опору кочення

Ця сила на пряму залежить від маси транспортного засобу і коефіцієнта тертя.  $G_a = 11\text{т}$ ;  $f = 0.01$  (асфальтобетон) і визначається наступним чином [2]:

$$F_K = G_a \cdot f = 11 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot 0,01 = 1079,1. \quad (2.7)$$

де  $G_a$  – маса ТЗ;  $f$  – коефіцієнт тертя.

### Сила опору підйому

Для розрахунку цієї сили використовуються значення кута нахилу дорожнього полотна відповідно до вимог будівництва доріг в Україні. Для

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

від'ємного значення нахилу дорожнього полотна розрахунки проводити не доцільно, тому візьмемо наступні значення:  $G_a = 11 \text{ м}$ ;  $\alpha_{\min} = 2,29^\circ$ ,  $\alpha_{\max} = 18^\circ$ .

Для мінімального кута нахилу дорожнього полотна, силу опору підйому розраховуємо за формулою:

$$F_{\Pi} = G_a \cdot \sin(\alpha_{\min}) = 4316,4 \text{ Н} . \quad (2.8)$$

Для максимального кута нахилу виконуємо відповідні розрахунки:

$$F_{\Pi} = G_a \cdot \sin(\alpha_{\max}) = 32373 \text{ Н} . \quad (2.9)$$

де  $\alpha_{\min}$  і  $\alpha_{\max}$  - кути нахилу дорожнього полотна.

### Сила опору повітря

Для розрахунку цієї сили задаємося коефіцієнтом обтікання повітря  $c_x = 0,7$  (для автобуса) та середньою густиною повітря  $\rho_{\text{Пов}} = 1,202 \text{ кг} / \text{м}^3$ .

Транспортний засіб наступні габарити: ширина – 2,7 м; висота – 2,5 м; довжина – 11 м. Отже максимальну площу поперечного перерізу, відповідно до габаритів ТЗ визначається наступним чином:  $A = 2,7 \cdot 2,5 = 6,75 \text{ м}^2$ .

$$F_{\text{Пов}} = 0,5 \cdot c_x \cdot A \cdot \rho_{\text{Пов}} \cdot V^2 = 2,847 \cdot V^2 . \quad (2.10)$$

де  $c_x$  - безрозмірний коефіцієнт обтікання повітрям, який залежить від форми тіла,  $\rho_{\text{Пов}}$  – густина повітря,  $A$  – площа Міделева зрізу (площа поперечної проекції) автомобіля  $\text{м}^2$ ,  $V$  – швидкість автомобіля,  $\text{м/с}$ .

### Сила інерції

Для розрахунку сили інерції, відповідно до формули 2.4, потрібно розрахувати силу опору розгону [4].

Для розрахунку цієї сили задаємося двигуном ДТА-1У, оберемо момент інерції двигуна  $J_{\partial} = 3,6 \text{ кг} / \text{м}^2$ .

Обираємо параметри колеса для ТЗ, радіус, діаметр і маса відповідно:  $R22,5 \text{ (inch)}$ ,  $D = 960 \text{ мм}$ ,  $m = 19,8 \text{ кг}$ .

Масу транспорту візьмемо  $m_a = 11 \text{ т}$ .

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Момент інерції для подальших розрахунків розрахуємо за формулою:

$$J_K = \frac{4 \cdot m \cdot R^2}{2}. \quad (2.11)$$

де  $m$  – маса одного колеса;  $R$  - радіус колеса.

Кількість обертів  $N_{(k)\max}$  колеса за минуту для максимальної швидкості  $V_{\max} = 60 \text{ км/год}$ :

$$N_{(k)\max} = \frac{V_{\max} \cdot 100}{6\pi D} = 331,57 \text{ об/хв}. \quad (2.12)$$

де  $V_{\max}$  - максимальна швидкість ТЗ;  $D$  – діаметр колеса.

Кутову швидкість колеса розрахуємо по формулі:

$$\omega_K = 2 \cdot \pi \cdot D \cdot N = 34,72 \text{ рад/с}. \quad (2.13)$$

де  $N$  - кількість обертів колеса.

Кутова швидкість двигуна відповідно до співвідношення  $\omega_k = 10 \cdot \omega_\partial$  буде дорівнювати:

$$\omega_\partial = \omega_K \cdot 10 = 347,2 \text{ рад/с}. \quad (2.14)$$

Відповідно швидкість транспортного засобу буде визначатися за наступною формулою:

$$V = \frac{\omega_k \cdot D}{2}. \quad (2.15)$$

Із рівняння 2.5 виводимо і спрощуємо рівняння ефективної маси:

$$m_E = m_a + \frac{J_\partial \omega_\partial^2 + J_K \omega_K^2}{(0.5 \cdot \omega_K \cdot D)^2} = 12602,1 \text{ кг}. \quad (2.16)$$

Значення цієї маси потрібне для розрахунку сили інерції:

$$F_I = m_E \cdot a = 12602,1 \cdot a. \quad (2.17)$$

**Сила тяги**

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37



Сила тяги ТЗ  $F_T$  повинна бути рівною або перевищувати сумарну силу опору  $F_\Sigma$  [21].

$$F_\Sigma = F_K + F_\Pi + F_{\text{Пов}} + F_I. \quad (2.18)$$

де  $F_K, F_\Pi, F_{\text{Пов}}, F_I$  – сила опору кочення коліс, підйому, повітря, інерції відповідно.

$$F_\Sigma = 33452.1 + 2,847 \cdot V^2 + 12602.1 \cdot a. \quad (2.19)$$

Враховуючи електричні та механічні втрати, які визначаються коефіцієнтами корисної дії електричної  $\eta_e$  та механічної  $\eta_M$  частин тягової установки, сила тяги двигуна може бути записана так:

$$F_T = \frac{F_K + F_\Pi + F_{\text{Пов}} + F_I}{\eta_e \eta_M}. \quad (2.20)$$

Враховуючи значення електричних та механічних втрат  $KKД_{\text{ЕЛ}} = 0,9$ ;  $KKД_{\text{МЕХ}} = 0,95$ , значення сили тяги буде наступним:

$$F_T = 39125.26 + 3,33 \cdot V^2 + 14739,3 \cdot a. \quad (2.21)$$

Замінюємо константи, які ми отримали після підрахунків на постійні коефіцієнти.

$$F_T = K_0 + K_1 \cdot V^2 + K_2 \cdot a. \quad (2.22)$$

де  $K_0, K_1, K_2$  – постійні коефіцієнти.

## 2.6 Розрахунок режимів руху транспортного засобу

Розглянемо типову тахограму руху транспортного засобу, зображену на рис. 2.8.

Згідно з тахограмою ТЗ має три режими руху [7]:

- розгін з постійним прискоренням  $a_p$  до максимальної швидкості  $V_{\text{max}}$ ;
- рух з постійною швидкістю  $V_{\text{max}}$ ;
- гальмування з постійним прискоренням  $a_z$ .

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Для розрахунку режимів руху ТЗ задаємося, що електробус може розвивати максимальну швидкість  $V_{\max} = 60 \text{ км/год}$ . Час, за який він зможе розігнатися до заданої швидкості складає  $T_1 = 20 \text{ с}$ . Оберемо середню відстань між зупинками в 1 км і проведемо розрахунки енергії для різних режимів руху ТЗ.

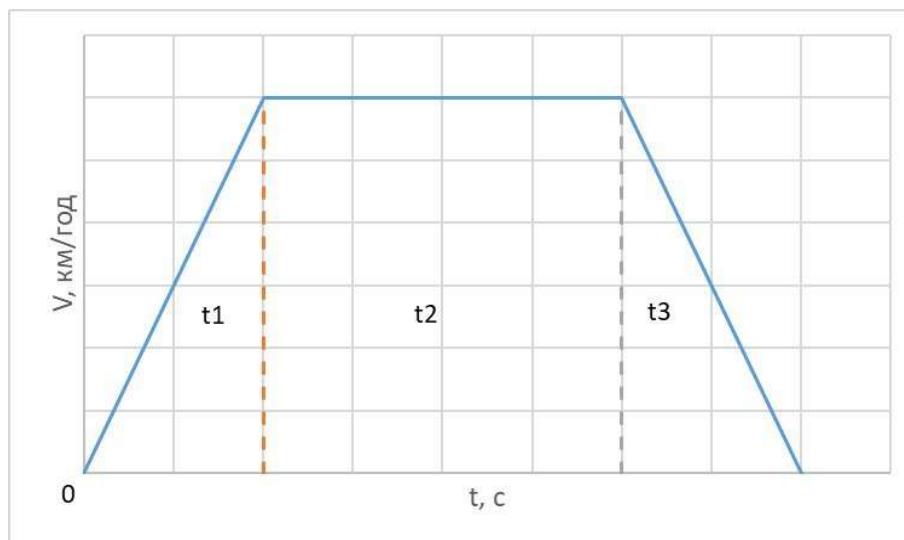


Рис. 2.8 Тахограма руху електробусу:  $t_1$  - інтервал розгону;  $t_2$  - інтервал постійної швидкості;  $t_3$  - інтервал гальмування

Так як у нас рівноприскорений рух, то прискорення розраховуємо за формулою:

$$a_p = \frac{V_{\max}}{t_1} = 0.83 \text{ м/с}^2. \quad (2.23)$$

де  $t_1$  - час розгону ТЗ.

Для наглядного зображення маршруту, який проходить електробус, відповідно до тахограми руху (див. рис. 2.8) розділимо його на проміжки, які зображені на рис. 2.9:

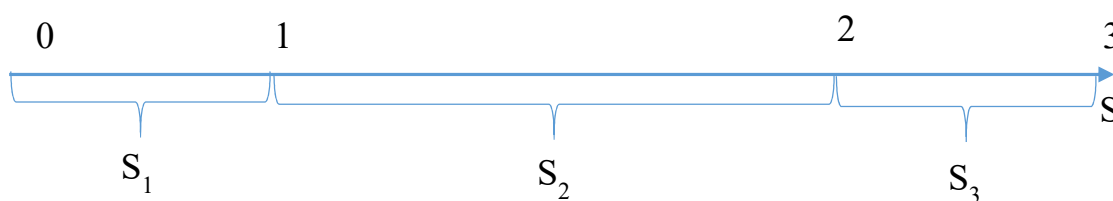


Рис. 2.9 Розподіл руху ТЗ на проміжки

Відстань, яку потрібно подолати для розгону до 60 км/год розрахуємо за наступною формулою:

$$S_1 = \frac{V_{\max}^2 - V_0^2}{2 \cdot a_p} = 167.33 \text{ м.} \quad (2.24)$$

де  $V_{\max}$  - максимальна швидкість ТЗ;  $V_0$  - початкова швидкість ТЗ.

Відповідно визначаємо шлях, який потрібен для повної зупинки та відстань, на якій електробус буде рухатися без прискорення з максимальною швидкістю.

$$S_3 = S_1 = 167.33(м). \quad (2.25)$$

де  $S_1$  - шлях прискорення;  $S_3$  - шлях гальмування.

$$S_2 = S - (S_1 + S_3) = 665.34(м). \quad (2.26)$$

де  $S$  - повний шлях;  $S_2$  - шлях рівномірного руху.

Згідно з цим розподілом напишемо систему рівнянь залежності прискорення від шляху та швидкості від шляху відповідно:

$$a(S) = \begin{cases} a_p, S \leq S_2; \\ 0, S_1 < S \leq S_3; \\ -a_p, S > S_2. \end{cases} \quad (2.27)$$

$$V(S) = \begin{cases} \sqrt{2 \cdot a_p \cdot S}, S \leq S_2; \\ V_{\max}, S_1 < S \leq S_3; \\ V_{\max} - \sqrt{2 \cdot a_p \cdot S}, S > S_2. \end{cases} \quad (2.28)$$

Таким самим чином розподілимо енергії, які потрібні ТЗ для подолання всього шляху на три складові:

$$W = W_1 + W_2 + W_3. \quad (2.29)$$

де  $W_1$  - енергія, яка потрібна для розгону;  $W_2$  - енергія, яка потрібна для рівномірного руху;  $W_3$  - енергія, яка потрібна для зупинки.

Виведемо аналітично значення швидкості:

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S_1 = \frac{V_{\max}^2 - V_0^2}{2 \cdot a_p}; V_0 = 0 \Rightarrow V = \sqrt{2 \cdot a_p \cdot S_1}. \quad (2.30)$$

Для того, щоб порахувати енергію, інтегруємо силу на кожній ділянці по відстані, це еквівалентно роботі за формулою (2.22). Формула для кожної з ділянок наведена нижче:

$$W_{(i)} = \int F_{T(i)}(V, a) dS_{(i)}. \quad (2.31)$$

Підставивши значення сили тяги отримуємо наступні інтеграли:

$$W_1 = \int (K_0 + K_1 \cdot V^2 + K_2 \cdot a_p) dS = K_0 \cdot S_1 + K_1 \cdot 2 \cdot a_p \cdot \frac{S_1^2}{2} + K_2 \cdot a_p \cdot S_1. \quad (2.32)$$

$$W_2 = \int (K_0 + K_1 \cdot V^2 + K_2 \cdot a_p) dS = K_0 \cdot S_2 + K_1 \cdot V^2 \cdot S_2. \quad (2.33)$$

$$W_3 = \int (K_0 + K_1 \cdot V^2 + K_2 \cdot a_p) dS = K_0 \cdot S_3 + K_1 \cdot V_{\max}^2 \cdot S_3 - \frac{K_1 \cdot 2 \cdot V_{\max} \sqrt{2 \cdot a_p} \cdot 2 \sqrt{S_3^3}}{3} + K_1 \cdot 2 \cdot a_p \cdot \frac{S_3^2}{2} - K_2 \cdot a_p \cdot S_3. \quad (2.34)$$

Для того, щоб проаналізувати потужність, що споживається тяговою системою від часу, візьмемо похідні енергії на кожному проміжку від часу за наступною формулою:

$$\frac{dW}{dt} = P(t). \quad (2.35)$$

На всіх інтервалах прискорення має різні значення, тому для кожної похідної проміжки руху ТЗ будуть розраховуватись окремо. Проміжок розгону, постійної швидкості та зниження швидкості відповідно:

$$S_1 = \frac{a_p \cdot t_1^2}{2}. \quad (2.36)$$

$$S_2 = V \cdot t_2. \quad (2.37)$$

$$S_3 = V \cdot t_3 - \frac{a \cdot t_3^2}{2}. \quad (2.38)$$

Значення похідних в аналітичному вигляді записані нижче:

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

$$\frac{dW_1}{dt} = \frac{d(K_0 \cdot S_1 + K_1 \cdot 2 \cdot a_p \cdot \frac{S_1^2}{2} + K_2 \cdot a_p \cdot S_1)}{dt} =$$

$$K_0 \cdot a_p \cdot t_1 + K_1 \cdot a_p^3 \cdot t_1^3 + K_2 \cdot a_p^2 \cdot t_1. \quad (2.39)$$

$$\frac{dW_2}{dt} = \frac{d(K_0 \cdot S_2 + K_1 \cdot V^2 \cdot S_2)}{dt} = K_0 \cdot V + K_1 \cdot V^3. \quad (2.40)$$

$$\frac{dW_3}{dt} = \frac{d(K_0 \cdot S_3 + K_1 \cdot V_{\max}^2 \cdot S_3 -$$

$$- \frac{K_1 \cdot 2 \cdot V_{\max} \sqrt{2 \cdot a_p} \cdot 2 \sqrt{S_3^3}}{3} + K_1 \cdot 2 \cdot a_p \cdot \frac{S_3^2}{2} - K_2 \cdot a_p \cdot S_3)}{dt}. \quad (2.41)$$

В таблиці 2.1 напишемо вже пораховані значення потужності та енергії, які потрібні ТЗ при різних значеннях швидкості для подолання порахованої відстані на різних проміжках руху.

Таблиця 2.1

Значення енергії та потужності для деяких значень швидкості і нахилу дорожнього полотна

		V1=10	V3=30	V6=60
$\alpha=18^\circ$	$W_1$	$9,781 \cdot 10^5$	$3,23 \cdot 10^6$	$7,92 \cdot 10^6$
	$W_2$	$3,161 \cdot 10^7$	$2,804 \cdot 10^7$	$2,283 \cdot 10^7$
	$W_3$	$8,807 \cdot 10^5$	$2,353 \cdot 10^6$	$3,847 \cdot 10^6$
	$P_1$	$9,785 \cdot 10^4$	$3,242 \cdot 10^5$	$7,457 \cdot 10^5$
	$P_2$	$9,298 \cdot 10^4$	$2,804 \cdot 10^5$	$5,775 \cdot 10^5$
	$P_3$	$-1,894 \cdot 10^{-10}$	$-1,358 \cdot 10^{-10}$	$-1,358 \cdot 10^{-8}$
$\alpha=0$	$W_1$	$7,89 \cdot 10^4$	$5,357 \cdot 10^5$	$1,996 \cdot 10^6$
	$W_2$	$1,04 \cdot 10^6$	$1,064 \cdot 10^6$	$1,247 \cdot 10^6$
	$W_3$	$-1,854 \cdot 10^4$	$-3,449 \cdot 10^5$	$-1,548 \cdot 10^6$
	$P_1$	$7,92 \cdot 10^3$	$5,44 \cdot 10^4$	$2,062 \cdot 10^5$
	$P_2$	$3,059 \cdot 10^3$	$1,064 \cdot 10^4$	$3,117 \cdot 10^4$
	$P_3$	$9,511 \cdot 10^{-14}$	$2,547 \cdot 10^{-11}$	$6,792 \cdot 10^{-11}$

Для ТЗ з висотою 2,5 м, шириною 2,7 м, масою 11 т, радіусом шин колеса 0,372 м, максимальною швидкістю 60 км/год та тахограмою руху,

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

представленою на рис. 2.8 побудуємо залежність потужності від часу  $P(t)$ , яка необхідна для руху в заданому швидкісному режимі з максимальною швидкістю  $V_{\max} = 60 \text{ км/год}$  показано на рис. 2.10.

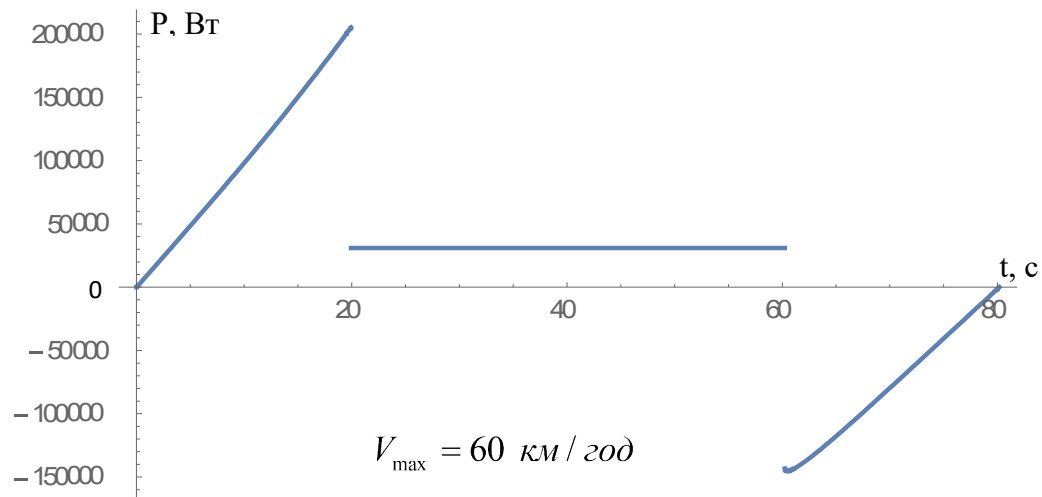


Рис. 2.10 Залежність потужності, необхідної для руху ТЗ, від часу для  $\alpha=0^\circ$

На рис. 2.10 показано залежність потужності від часу лише на максимальній швидкості, графіки потужностей для швидкостей 10-50 км/год мають таку ж саму залежність.

Під час розгону ТЗ буде витрачати найбільшу потужність. При постійній швидкості сили, які діють на ТЗ будуть менші, ніж у початковий момент часу [1] [22].

При гальмуванні відбувається процес рекуперації, тобто електродвигун буде віддавати енергію до бортової мережі. Відповідно до цього енергія на третій ділянці потужність має менше значення, ніж на інших. Найбільша потужність відбирається під час розгону транспортного засобу, тому в дійсності на великих швидкостях обмежують прискорення, це дозволяє зменшити значення потужності, а отже і кількість енергії, які будуть відбиратись від аккумулятора [7].

Принцип обмеження прискорення показано на рис. 2.11.

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

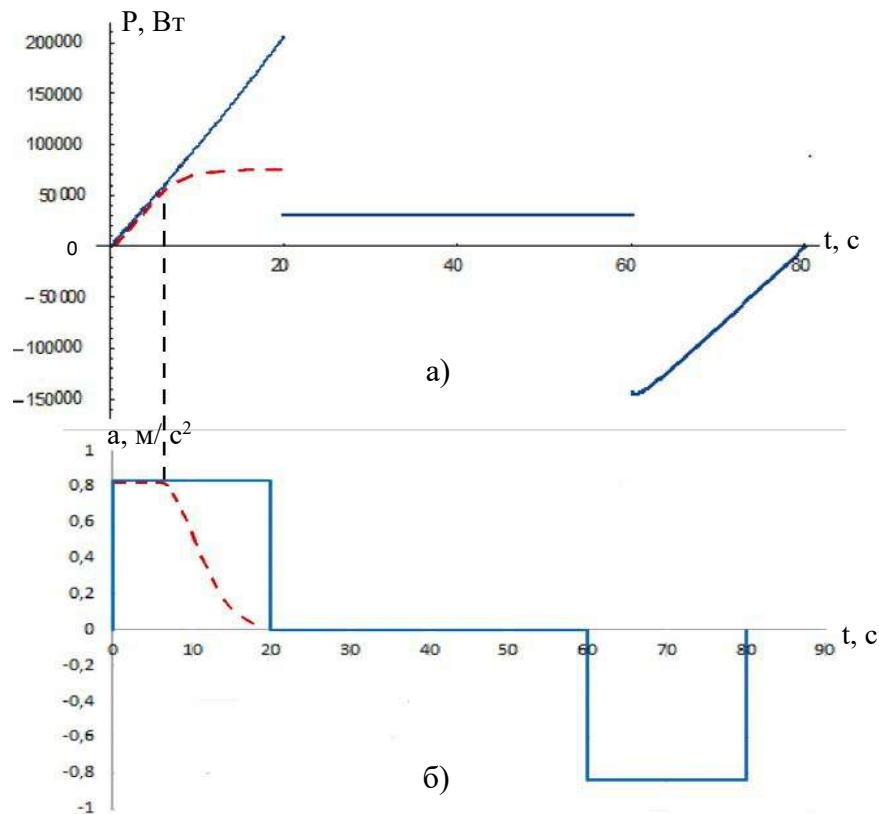


Рис. 2.11. Ілюстрація принципу обмеження прискорення під час розгону: а) залежність потужності від часу, б) залежність прискорення від часу.

## 2.7 Розрахунок акумуляторної батареї

Подальші розрахунки проводяться для максимального кута нахилу дорожнього полотна, в такому випадку ТЗ споживає найбільшу кількість енергії.

Для розрахунку акумуляторної батареї, її номінальну напругу обираємо з умови, що мінімальна напруга бортової мережі має значення 400 В, а при її підвищенні буде працювати понижуючий перетворювач, керуючись середніми параметрами літєвих джерел, напругу акумулятора оберемо наступним співвідношенням:

$$U = \frac{U_{ном}}{U_{повн.зар.}} \cdot U_{зар} = \frac{3,7}{4,2} \cdot 400 = 340 В. \quad (2.42)$$

де  $U_{ном}$  - номінальна напруга акумулятора;  $U_{повн.зар.}$  - напруга повністю зарядженого акумулятора.

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Розрахуємо її базові параметри.

Знайдемо середню потужність, яку повинен видати акумулятор на протязі всього шляху:

$$P_{сер} = \frac{W1 + W2 + W3}{t} = 42,6 \cdot 10^4 \text{ Вт}. \quad (2.43)$$

Для розрахунку акумулятора використовуючи обмеження прискорення, візьмемо граничне значення потужності  $P = 200 \text{ кВт}$ .

Максимальне значення струму в такому випадку буде розраховуватись за наступним виразом:

$$I_{сер} = \frac{P}{U} = 588 \text{ А}. \quad (2.44)$$

Обираємо акумулятор Efest 21700 3700 мАгод.

Характеристики:

- тип елементу: Li-ion;
- типорозмір: 21700;
- номінальна ємність: 3700mAh;
- номінальна напруга: 3,7 В;
- напруга повного заряду: 4,2 В;
- напруга повного розряду: 2,5 В;
- максимальна постійна струмовіддача: 35А;
- номінальний опір: 20mOhm;
- рекомендований струм заряду: 2А;
- максимальний струм заряду: 4А;
- температурний режим використання: -20~75°C;
- розміри: 21x70мм;
- вага: 73,12гр.

Розрахуємо кількість послідовно з'єднаних акумуляторів, які необхідні для утворення необхідної напруги:

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



$$n_U = \frac{U}{U_{ном.акум}} = 92 \text{ шт.} \quad (2.45)$$

де  $U_{ном.акум}$  - номінальна напруга акумулятора, В.

Для напруги в 340 В необхідно з'єднати 92 акумулятори послідовно.

Враховуючи максимальне значення струму акумулятора,  $I_{макс.акум} = 35 \text{ А}$  розрахуємо мінімальну кількість акумуляторів для забезпечення середнього струму, розрахованого за формулою (2.44).

$$n_I = \frac{I}{I_{акум}} \approx 17 \text{ шт.} \quad (2.46)$$

Для струму в 588 А необхідно з'єднати 36 блоків із 92 акумуляторів, паралельно.

Отже ємність, кількість елементів і маса такого акумулятора визначаються наступними формулами [23]:

$$C_{акум_{max}} = 17 \cdot 3700 = 62,9 \text{ А} \cdot \text{год.} \quad (2.47)$$

$$N_{акум} = 17 \cdot 92 = 1564 \text{ шт.} \quad (2.48)$$

$$m_{ном} = 1564 \cdot 0,07312 = 114,36 \text{ кг.} \quad (2.49)$$

Відповідно до розрахованого значення  $N_{акум}$ , габарити такої батареї будуть мати такі значення:

$$0,07 \text{ м} \times 0,84 \text{ м} \times 0,82 \text{ м} (В \times Ш \times Д). \quad (2.50)$$

Також виконаємо розрахунки рекомендованого струму заряджання електробуса та в нічний час. В середньому час нічної зупинки візьмемо 8 годин, то струм заряджання визначимо за наступною формулою:

$$I_{зар} = \frac{C_{акум}}{T_{ніч}} = 7,86 \text{ А.} \quad (2.51)$$

І як відомо, рекомендований струм заряджання для буферного режиму роботи акумулятора визначається наступним співвідношенням:

$$I_{зар}^{рек} \approx 0,8 \cdot C_{акум} \approx 50 \text{ А.} \quad (2.52)$$

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Як видно із формул, рекомендований струм більший за струм нічної зарядки, з чого можна зробити висновок, що режим нічного заряджання електробуса буде підтримувати стан акумуляторних батарей в належному стані.

## 2.8 Розрахунок елементів силовій частини схеми зарядного пристрою

Перетворювач працює в імпульсному режимі, розрахунок елементів схеми проводиться для граничних режимів роботи схеми.

Перший режим роботи буде при роботі перетворювача з максимальною напругою та мінімальним струмом.

Другий режим – з мінімальною напругою та максимальним струмом.

### 2.8.1 Розрахунок для понижуючого перетворювача

Вхідна напруга може змінюватися в межах від  $U_{\min} = 400 \text{ В}$  до  $U_{\max} = 600 \text{ В}$  вольт, а перетворювач розрахований на  $P = 100 \text{ кВт}$ , отже перший режим роботи буде при вхідній напрузі 600 В та струмі в 166 А, другий - при напрузі 400 В та струмі 250 А.

Визначимо максимальний та мінімальний коефіцієнт заповнення імпульсів перетворювача [24].

Скважність (або коефіцієнт заповнення імпульсів) для даного режиму роботи буде визначатися з цього відношення [25]:  $U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \cdot \gamma$

Отже для отримання максимального та мінімального коефіцієнту заповнення імпульсів понижуючого перетворювача, використаємо значення напруги для двох, вище зазначених, режимів роботи перетворювача:

$$\gamma_{\min} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх\_max}}} = \frac{340}{600} = 0,56. \quad (2.53)$$

$$\gamma_{\max} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх\_min}}} = \frac{340}{400} = 0,85. \quad (2.54)$$

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже коефіцієнт заповнення імпульсів змінюється в межах від 0,56 до 0,85.

### Для першого режиму

Розрахуємо мінімальну ємність конденсатора та котушки індуктивності для першого режиму роботи перетворювача, коли буде максимальне значення напруги та мінімальне значення струму.

Формула для розрахунку ємності конденсатора виглядає так [26]:

$$C \geq \frac{1 - \gamma_{\max}}{8 \cdot f \cdot k_{\Pi} \cdot R_{H \cdot \max} \cdot (1 - \gamma_{\min})}. \quad (2.55)$$

де,  $\gamma$  – скважність;  $k_{\Pi}$  – коефіцієнт пульсацій;  $f$  - частота;  $R_H$  - опір навантаження.

Коефіцієнт пульсації напруги визначимо за наступною формулою:

$$k_{\Pi}^U = \frac{U_{\text{ex}}}{U_{\text{вих}}} = \frac{\frac{2}{\pi} \cdot U_{\text{ex}} \cdot \sin(\pi \cdot \gamma)}{U_{\text{вих}}} = 0,035. \quad (2.56)$$

де,  $U_{\text{ex}}$  - змінна складова напруги на вході.

Отримавши коефіцієнт пульсацій в 3,5% розрахуємо необхідне значення ємності конденсатора за формулою (2.41).

$$C = \frac{1 - \gamma_{\max}}{8 \cdot f \cdot k_{\Pi} \cdot R_{H \cdot \max} \cdot (1 - \gamma_{\min})} = 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}. \quad (2.57)$$

Для забезпечення неперервного струму в перетворювачі з коефіцієнтом пульсацій 3,5%, розрахуємо граничне (мінімальне) значення котушки індуктивності [27]. Для цього повинна виконуватись умова [26]:

$$L_{\text{зр. min}} \geq R_{H \cdot \max} \frac{(1 - \gamma_{\max})}{k_{\Pi} \cdot 2 \cdot f}. \quad (2.58)$$

З цієї умови розраховуємо індуктивність:

$$L_1 = \frac{U_H}{I_H} \cdot \frac{(1 - \gamma_{\max})}{k_{\Pi} \cdot 2 \cdot f} = 0,19 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}. \quad (2.59)$$

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### Для другого режиму

Для другого режиму проводимо розрахунки відповідно так само, як і для першого режиму, по формулам (2.55) і (2.58):

$$C = \frac{1 - \gamma_{\max}}{8 \cdot f \cdot k_{\Pi} \cdot R_{H \cdot \max} \cdot (1 - \gamma_{\min})} = 19 \cdot 10^{-6} \Phi . \quad (2.60)$$

$$L_1 = \frac{U_H}{I_H} \cdot \frac{(1 - \gamma_{\max})}{k_{\Pi} \cdot 2 \cdot f} = 0,085 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} . \quad (2.61)$$

### 2.8.2 Розрахунок для підвищувального перетворювача

Регульовальна характеристика для підвищувального перетворювача має наступний вигляд:

$$U_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{вх}}}{(1 - \gamma)} \Rightarrow \gamma = 1 - \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вих}}} . \quad (2.62)$$

Отже для отримання максимального та мінімального коефіцієнту заповнення імпульсів підвищувального перетворювача, використаємо значення напруг для двох, вище зазначених, режимів роботи перетворювача:

$$\gamma_{\max} = 1 - \frac{600}{340} = 0,76 . \quad (2.63)$$

$$\gamma_{\min} = 1 - \frac{400}{340} = 0,17 . \quad (2.64)$$

Отже коефіцієнт заповнення імпульсів змінюється в межах від 0,17 до 0,76.

Розрахуємо ємність конденсатора виходячи з розрахунку коефіцієнта заповнення імпульсів для роботи підвищувального перетворювача для першого та другого режимів, відповідно до формул (2.55) і (2.58).

### Для першого режиму

$$C = \frac{1 - \gamma_{\max}}{8 \cdot f \cdot k_{\Pi} \cdot R_{H \cdot \max} \cdot (1 - \gamma_{\min})} = 7,1 \cdot 10^{-6} \Phi . \quad (2.65)$$

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$L_1 = \frac{U_H}{I_H} \cdot \frac{(1 - \gamma_{\max})}{k_{II} \cdot 2 \cdot f} = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} . \quad (2.66)$$

Для другого режиму

$$C = \frac{1 - \gamma_{\max}}{8 \cdot f \cdot k_{II} \cdot R_{H \cdot \max} \cdot (1 - \gamma_{\min})} = 16 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} . \quad (2.67)$$

$$L_1 = \frac{U_H}{I_H} \cdot \frac{(1 - D_{\max})}{k_{II} \cdot 2 \cdot f} = 0,14 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} . \quad (2.68)$$

В схему перетворювача необхідно взяти номінали ємності та індуктивності більші, ніж розраховані у попередніх пунктах.

Оберемо транзистори для силової частини зарядного пристрою за наступними критеріями:  $U_{KE}$  і  $I_K$ .

Оскільки вхідна напруга може змінюватися в межах від  $U_{\min} = 400 \text{ В}$  до  $U_{\max} = 600 \text{ В}$  вольт, а перетворювач розрахований на  $P = 100 \text{ кВт}$ , то в першому режимі роботи вхідна напруга буде мати значення  $U_{\max} = 600 \text{ В}$  і струм  $I_{\min} = 166 \text{ А}$ , а другому - напруга  $U_{\min} = 400 \text{ В}$  та струм  $I_{\max} = 250 \text{ А}$ .

В граничному режимі транзистор повинен витримувати напругу в  $U_{\max} = 600 \text{ В}$  і струм в  $I_{\max} = 250 \text{ А}$ .

По цим параметрам оберемо силовий модуль IGBT: SEMiX353GB126HD [18]. Основні параметри цього елементів таблиця 2.2:

Таблиця 2.2  
Основні характеристики транзистора SEMiX353GB126HD

Напруга колектор емітер (UCES), В	1200
Напруга база-емітер (UGE), В	-20..20
Час наростання (ton), нс	55
Час спаду (tof), нс	120
Повний заряд затвору, мкКл	2400
Номінальний струм колектора (Ic), А	360
Наявність діода	Так
Номінальний струм діоду (IF), А	320

Будемо використовувати цей транзисторний модуль IGBT як для понижаючого, так і для підвищуючого перетворювача.

## 2.9 Розрахунок перетворювача 600-24В

Розраховуваний мостовий інвертор напруги складається з чотирьох транзисторів, чотирьох діодів (якщо вони не вбудовані в транзистори) та трансформатора (див. рис. 2.6). Оберемо силові транзистори для інвертора використовуючи наступні умови:

- Вихідна потужність  $P_{вих} = 4 \text{ кВт}$ ;
- $ККД_{інв}(\eta_{інв}) = 0,85$ ;
- Вхідна напруга  $340..600 \text{ В}$ ;
- Вихідна напруга  $U_{вих} = 24 \text{ В}$ .

Враховуючи ККД інвертора, максимальну вхідну потужність, яка буде надходити до інвертора, розрахуємо за такою формулою:

$$P_{вх} = \frac{P_{вих}}{\eta_{інв}} = 4600 \text{ Вт} \quad (2.69)$$

Відповідно до заданих вище початкових параметрів інвертора, максимальні вхідні значення напруги та струму будуть складати:  $U_{вх} = 600 \text{ В}$  і  $I_{вх} = 13,5 \text{ А}$  відповідно. На виході інвертора відповідно значення вихідної потужності напруга та струм будуть мати наступні значення:  $U_{вих} = 24 \text{ В}$  і  $I_{вих} = 166,6 \text{ А}$ .

Виконаємо вибір керуючих транзисторів за вхідними параметрами інвертора. Цим параметрам відповідає польовий транзистор 2SK3528-01R [28].

Основні параметри такого транзистора наведені у таблиця 2.3.

На виході інвертора використовується двопівперіодний випрямляч напруги з нульовою точкою, він має два діоди, вони працюють по черзі, на кожен півперіод окремо

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Таблиця 2.3

Основні характеристики транзистора 2SK3528-01R

Напруга стік-витік ( $U_{DS}$ ), В	1200
Струм колектор-емітер-витік ( $I_d$ ), А	15
Максимально допустиме значення затвор-емітер ( $U_{ge\ max}$ ), В	20
Повний заряд затвора, нКл	140

. В такій схемі, зворотна напруга діода буде в двічі більшою ніж його вихідна напруга і матиме значення 48 В, а діюче значення струму, який буде проходити через кожен з діодів буде складати:

$$I_d = \frac{I_{вих}}{\sqrt{2}} = 135 \text{ А.} \quad (2.70)$$

де  $I_d$  - діюче значення струму через діод,  $I_{вих}$  - вихідний струм випрямляча.

Таким вимогам відповідає діод 150ebu02\_ir, який витримує 150 А прямого струму, та 200 В падіння зворотної напруги, має час відновлення 45 нс і падіння прямої напруги  $U_{np}^{VD} = 0.99 \text{ В}$ .

Розрахуємо вихідний конденсатор схеми С1, його ємність будемо розраховувати з умови:

$$C_1 \gg \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U} \gg 27,6 \text{ мкФ.} \quad (2.71)$$

Візьмемо ємність розрахованого конденсатора близьку до 2,7 мФ.

## 2.10 Розрахунок трансформатора перетворювача

Для розрахунку трансформатора початковими даними є напруга і частота.

Розрахунок трансформатора складається з наступних етапів: вибір типу магнітопровода, визначення типорозмірів магнітопровода, електричний розрахунок трансформатора. Також відомо наступні початкові умови [29]:

- габаритна потужність  $P_T = 4 \text{ кВт}$ ;
- вхідна напруга  $U_{вх} = 600 \text{ В}$ ;

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

- вихідна напруга  $U_{\text{вих}} = 24 \text{ В}$ ;
- $KKД_{\text{трансф}} = 0,95$ ;
- коефіцієнт форми змінного струму  $k_{\phi} = 1$ ;
- частота  $f = 40 \text{ кГц}$ ;
- густина струму  $j = 5 \text{ А/мм}^2$ ;
- максимальна індукція  $B_m = 0,3 \text{ Тл}$ ;
- коефіцієнт заповнення вікна  $k_0 = 0,4$ ;
- коефіцієнт заповнення сталі магнітопроводу  $k_c = 1$ .

### Геометричний розрахунок трансформатора

Розрахунок трансформатора починаємо з підбору магнітопроводу. Його ми будемо обирати знайшовши добуток площ вікна та сталі магнітопроводу.

Його розмір обирають за умовою [30]:

$$S_o^{O-C} \cdot S_c^{O-C} > S_o^{P-C} \cdot S_c^{P-C}. \quad (2.72)$$

де  $S_o^{O-C}$  - площа вікна обраного сердечника,  $S_o^{P-C}$  - площа сталі обраного сердечника,  $S_o^{P-C}$  - розрахована площа вікна,  $S_c^{P-C}$  - розрахована площа сталі.

Щоб значення добутку площ обраного сердечника була більша за розраховане значення. Його розрахунки проводять по значенням габаритної потужності та заданими умовами:

$$S_o^{P-C} \cdot S_c^{P-C} = \frac{P_{\Gamma} \cdot 100}{2 \cdot k_{\phi} \cdot f \cdot j \cdot B_m \cdot k_0 \cdot k_c} = 8,33 \text{ см}^4. \quad (2.73)$$

де  $S_o$  - площа вікна магнітопроводу, мм<sup>2</sup>;  $S_c$  - площа сталі магнітопроводу, мм<sup>2</sup>;  $k_{\phi}$  - це коефіцієнт форми змінного струму,  $f$  - частота, Гц;  $j$  - густина струму, А/мм<sup>2</sup>;  $B_m$  - максимальна індукція, Тл;  $k_0$  - коефіцієнт заповнення вікна магнітопроводу;  $k_c$  - коефіцієнт заповнення сталі магнітопроводу.

Візьмемо феритовий магнітопровід типу ETD 44/22/15 [30].

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53



Добуток його площ має значення  $S_O^{O-C} \cdot S_C^{O-C} = 33,08 \text{ см}^4$ , отже умова (2.72) виконується.

### Електричний розрахунок трансформатора

Кількість виткі на вольт ЕРС, що індукується в обмотці трансформатора визначається за формулою:

$$W_0 = \frac{10^4}{4 \cdot B_m \cdot f \cdot S_C} = 0,135. \quad (2.74)$$

Виходячи з цього кількість витків первинної та вторинної обмоток відповідно, визначаються наступним чином [31]:

$$W_1 = W_0 \cdot U_1 = 81,2. \quad (2.75)$$

$$W_2 = W_0 \cdot (U_2 + U_F^{VD}) = 3,375. \quad (2.76)$$

Розрахуємо коефіцієнт трансформації співвідношенням кількості обмоток:

$$m = \frac{W_2}{W_1} = 0,041. \quad (2.77)$$

де  $m$  - коефіцієнт трансформації трансформатора.

Округлимо кількість витків вторинної обмотки до 4 шт., і перерахуємо кількість витків первинної обмотки відповідно до коефіцієнта трансформації  $m$ .

$$W_1 = \frac{W_2}{m} = 98 \text{ шт.} \quad (2.78)$$

Зріз і діаметр проводів цих самих обмоток визначаються по формулам:

$$S_1 = \frac{I_1}{j} = 2,7 \text{ мм}^2. \quad (2.79)$$

$$S_2 = \frac{I_2}{j} = 38,2 \text{ мм}^2. \quad (2.80)$$

де  $S$  - зріз дроту обмотки.

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$d_1 = 1,13 \cdot \sqrt{q_1} = 1,857 \text{ мм.} \quad (2.81)$$

$$d_2 = 1,13 \cdot \sqrt{q_2} = 6,984 \text{ мм.} \quad (2.82)$$

Де  $d$  - діаметр проводу.

Оскільки в провіднику буде присутній скін-ефект [32], то один товстий провідник замінимо на багатожильний, для первинної обмотки візьмемо діаметр одного тонкого провідника  $d_1^{\text{ж}} = 0,127 \text{ мм}$  і його площу поперечного перерізу  $S_1^{\text{ж}} = 0,012 \text{ мм}^2$ . Кількість жилок в цьому провіднику розрахуємо за наступним співвідношенням:

$$n_1 = \frac{S_1}{S_1^{\text{ж}}} = 225 \text{ шт.} \quad (2.83)$$

$$n_2 = \frac{S_2}{S_1^{\text{ж}}} = 3183 \text{ шт.} \quad (2.84)$$

## 2.11 Розрахунок драйвера транзистора

Для керування силовими транзисторами оберемо драйвер, який буде задовольняти параметри силового ключа за наступними критеріями:  $V_{GE\_ON}$  і  $V_{GE\_OFF}$  - час відпирання і запирання відповідно,  $P_{POZ}$  - потужність розсіювання  $Q_{затв}$  - заряд затвора  $I_{OUT}$  - струм керування [33]. Драйвер затвора призначений для керування відпиранням та запиранням силового транзистора напівпровідникового приладу. Для цього драйвер виконує або заряд затвору силового напівпровідника до кінцевого відпираючого значення  $V_{GE\_ВІДП}$ , або розряджає його аж до досягання напруги на затворі запираючого рівня  $V_{GE\_MAX}$ . Ці параметри ми візьмемо з даташит транзистора.  $V_{GE\_ВІДП} = 5 \text{ В}$ ,  $V_{GE\_MAX} = 10 \text{ В}$ .

Для розрахунків візьмемо максимальне значення заряду затвору транзисторного модуля з даташит:

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q_{затв} = 68,5 \text{ мкКл}. \quad (2.85)$$

Частоту комутації розрахуємо з параметрів перетворювача. Ця схема працює з частотою  $f = 40 \text{ кГц}$ , оскільки перетворювач працює в імпульсному режимі, то за один період транзистор комутується двічі, відкривається та закривається. Тому задамося частотою комутації вдвічі більшою за частоту перетворювача:

$$f_K = 80 \text{ кГц}. \quad (2.86)$$

Перехід між двома рівнями напруг на затворі потребує розсіювання деякого визначеного рівня потужності в контурі між драйвером і затвором та та на резисторі в колі затвора транзистора. Ці два значення потужності приблизно рівні, тому таку потужність можна розрахувати за наступною формулою:

$$P_{роз} = 2 \cdot Q_{затв} \cdot f_K \cdot \Delta V_{затв} = 54,8 \text{ Вт}. \quad (2.87)$$

де  $Q_{затв}$  - заряд затвора,  $f_K$  - частота комутації,  $\Delta V_{затв}$  - різниця напруг керування транзистором.

## 2.12 Вибір драйвера для керування перетворювачем

За попередньо розрахованими параметрами оберемо напівмостовий драйвер IR2214 [34]. Відповідні його характеристики наведено в таблиця 2.4.

Задамося струмом керування  $I_{КЕР} = 1,5 \text{ А}$ , а вихідні максимальні струми обмежимо резисторами, для уникнення роботи драйвера в граничному режимі. Напруга керування змінюється в межах від 0 до рівня напруги живлення, а з даташиту транзисторний модуль (рисунок 5) переходить у повністю відкритий стан починаючи з 9,5 В і витримує максимально можливу напругу на затворі в 20 В, тому будемо використовувати напругу дещо меншу.

Нехай напруга живлення буде мати значення  $V_{КЕР} = V_S = 18 \text{ В}$ . Таким чином для розрахунку обмежувальних транзистора ми можемо використати наступну формулу:

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_{затв} = \frac{V_s}{I_{кер}} = 12 \text{ Ом.} \quad (2.88)$$

Таблиця 2.4  
Основні характеристики драйвера IR2214

Максимальний час наростання (ton), нс	35
Максимальний час спаду (tof), нс	25
Імпульсний вихідний струм верхнього ключа $I_{O+}$ , А	2
Імпульсний вихідний струм нижнього ключа $I_{O-}$ , А	3
Максимальна розсіювана потужність $P_{роз}$ , мВт	625
Напруга живлення $V_s$ , В	20
Вихідна напруга $V_o$ , В	$0..V_s$
Максимальна частота керування $f_{кер}$ , МГц	5

### 3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЗАРЯДНОГО ПРИСТРОЮ

Моделювання схеми необхідне для того, щоб перевірити працездатність розробленого пристрою та переконатися, що він працюватиме належним чином.

На етапі моделювання перетворювача розглянемо два режими роботи перетворювача: понижуючий і підвищуючий. Для понижуючого перетворювача створений алгоритм заряджання розрахованого акумулятора.

#### 3.1 Алгоритм заряджання

Заряджання акумулятора відбувається ІU методом. Алгоритм для заряджання акумулятора зображений на рис. 3.1.

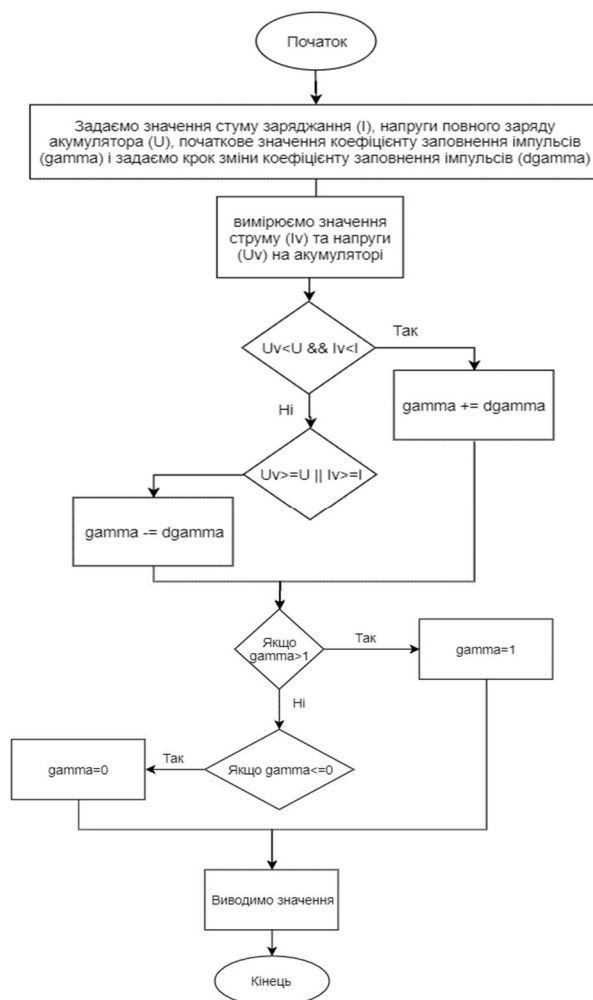


Рис. 3.1 Блок схема роботи ШІМ для понижуючого перетворювача

### 3.2 Модель для заряджання акумулятора

Для моделювання заряджання акумуляторної батареї використаємо середу розробки MatLab Simulink R2018a. Складена схема зображена на рис. 3.2 [35].

В схемній моделі, яка показана на рис. 3.2, використовується ключова модель транзистора, діода та акумуляторної батареї з характеристиками, відповідно до її хімічного складу.

Джерело напруги та котушка індуктивності вважаються ідеальними. Система керування для такої схеми реалізовувалася за допомогою підсистеми з S-функцією, в якій є можливість використовувати одну з наступних мов програмування: MATLAB, C, C++, Ada, або Fortran [36].

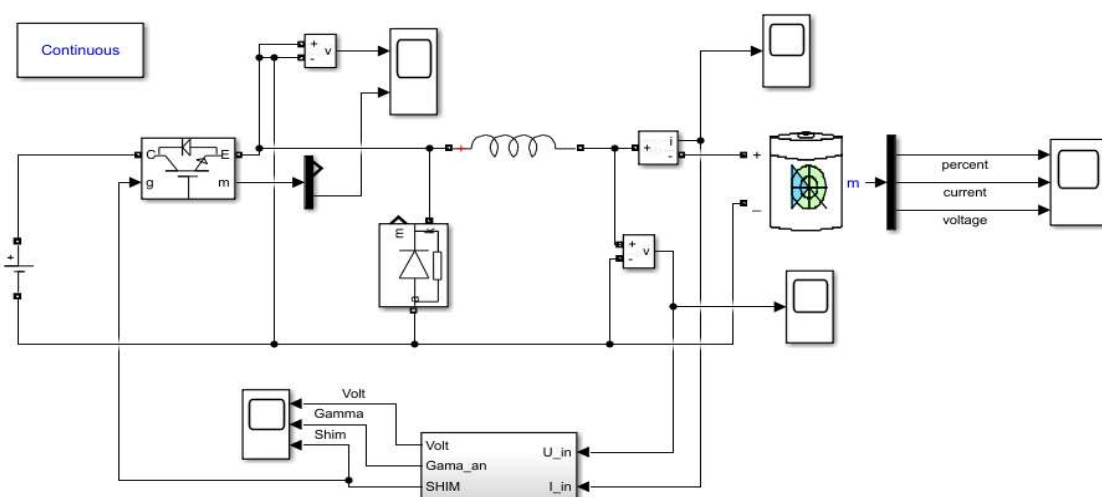


Рис. 3.2 Схемна модель понижуючого перетворювача

Така підсистема використовується, щоб реалізувати такий блок, якого немає в стандартних бібліотеках Simulink. На основі алгоритму, запропонованого на рис. 3.1, створена система керування, яка й виконувала умову для відповідного методу заряджання акумулятора, вона зображена на рис. 3.3 [37].

При довготривалому моделюванні утворилася проблема з недостатньою ресурсоемністю обчислювальної техніки. Тому на рис. 3.4, при заряді батареї в 52%, продемонстровано короткочасну ділянку режиму заряджання постійним

струмом, коли струм має максимальне значення заряджання акумулятора, а напруга ще не досягла свого максимуму.

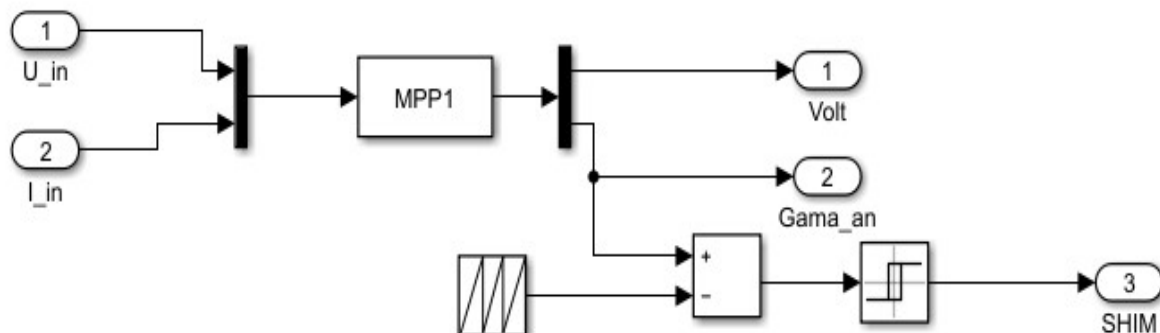


Рис. 3.3 Система керування

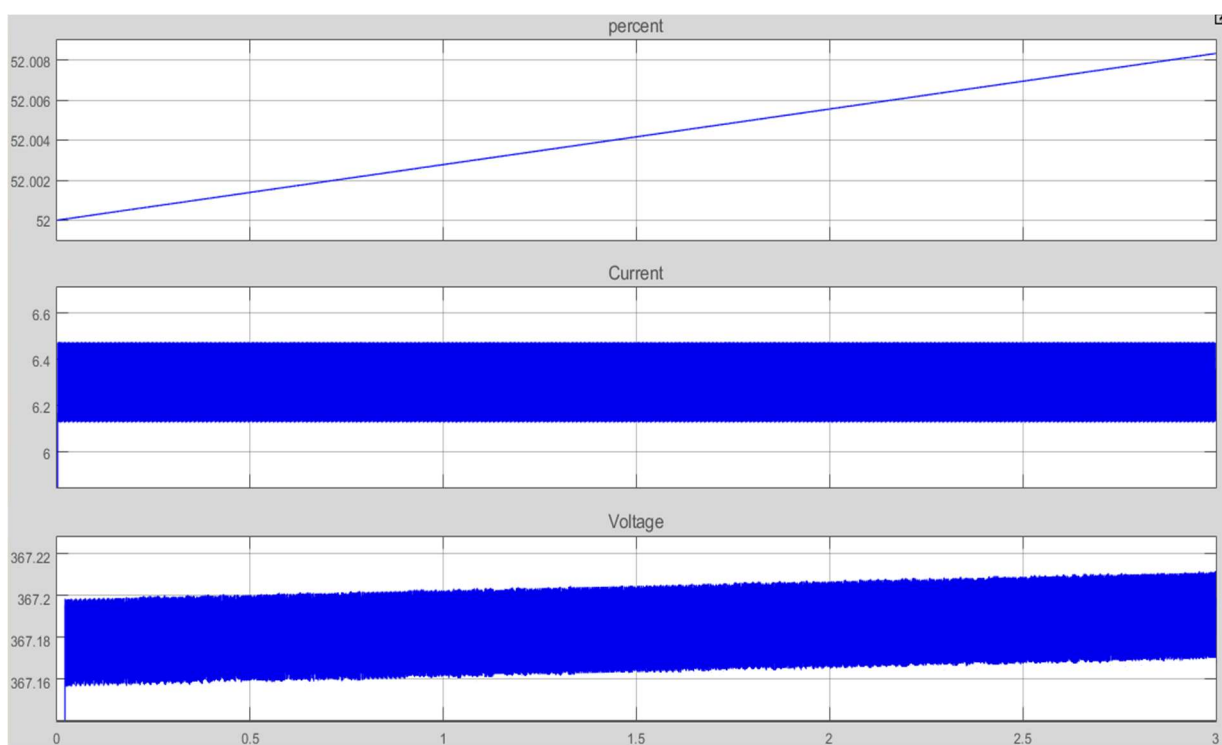


Рис. 3.4 Осцилограми роботи перетворювача в режимі постійного струму

На цій же схемі проведене моделювання для випадку заряджання при постійному значенні напруги. В цьому випадку відбувається зменшення струму при максимальному значенні напруги заряджання батареї. Осцилограма такої ситуації показана на рис. 3.5.

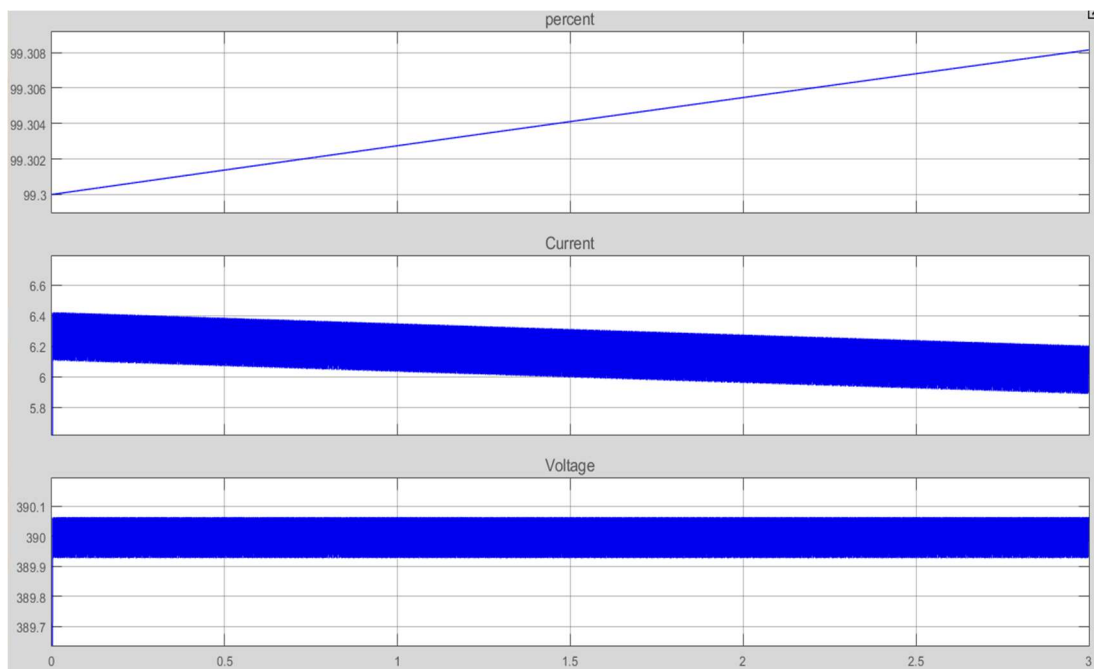


Рис. 3.5 Осцилограми роботи перетворювача в режимі постійної напруги

Проаналізувавши отримані осцилограми, можна зробити висновок, що режим роботи понижуючого перетворювача для заряджання акумуляторної батареї працює відповідно до проведених розрахунків.

### 3.3 Модель для розряджання акумулятора

Для розряджання акумулятора використовується підвищувальний перетворювач, який зможе перетворити напругу акумулятора до рівня напруги, яка потрібна для живлення тягової системи. Ця схема зображена на рис. 3.6

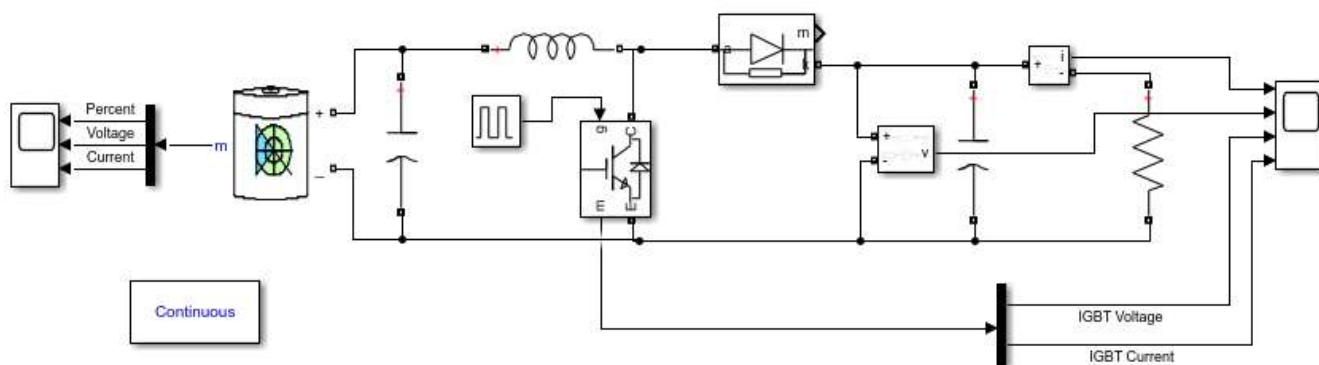


Рис. 3.6 Схемна модель підвищуючого перетворювача



Для моделювання використаємо спрощений варіант тягової системи у вигляді резистора.

Промодельюємо найпростіший випадок, при роботі на активне навантаження і незмінним коефіцієнтом заповнення імпульсів. Результуючі осцилограми розрядження після моделювання при опорі навантаження 3,6 Ом і коефіцієнті заповнення імпульсів 0,3, зображені на рис. 3.7.

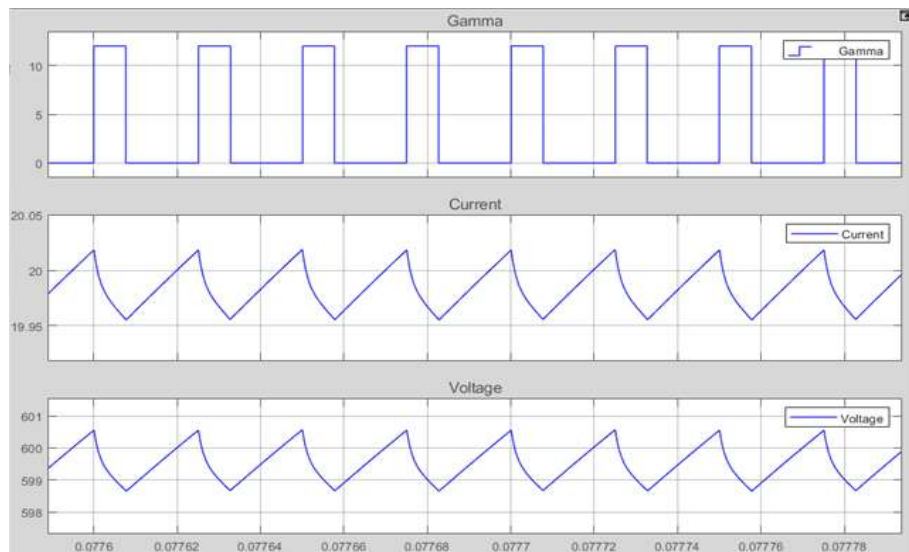


Рис. 3.7 Осцилограма роботи підвищуючого перетворювача

### 3.4 Алгоритм розрядження

Стабілізація вихідної напруги досягається шляхом регулювання часу відкритого стану силового ключа відносно періоду перемикання, тому алгоритм розрядження акумуляторної батареї можна реалізувати на основі ПІД-регулятора [38].

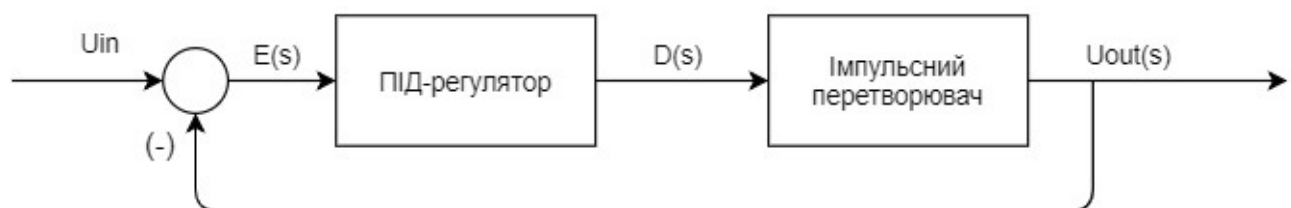


Рис. 3.8 Структурна схема ПІД-регулятора.  $U_{in}$  – керуючий сигнал;  $E$  – сигнал узгодження;  $D$  – вихідна величина регулятора;  $U_{out}$  – регульована величина.

Його суть заключається в корекції динамічних властивостей об'єкта керування за допомогою керуючого сигналу  $D(s)$  так, щоб реальний вихідний сигнал  $U_{in}$ , якомога менше відрізнявся від бажаного вихідного сигналу  $U_{out}(s)$ . Регулятор утворює керування, використовуючи помилку керування  $E_{(s)} = U_{IN} - U_{OUT(s)}$  [37].

Вихідна змінна  $D$ , регулятора описується наступним виразом:

$$D(t) = K(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t E(t) dt + T_d \frac{dE(t)}{dt} \quad (3.1)$$

Де  $t$  – час,  $K$ ,  $T_i, T_d$  – пропорційний коефіцієнт (безрозмірний), постійна інтегрування (розмірність часу) і постійна диференціювання (розмірність часу) регулятора.

Для оцінки динамічних властивостей системи часто розглядається реакція на одиничний ступінчатий вплив. Перехідний процес повинен відповідати заданим показникам якості, до яких відносять час перехідного процесу, перерегулювання та коливальність. Можуть також використовуватись інтегральні оцінки якості перехідного процесу.

### 3.5 Живлення для системи керування

Для живлення системи керування необхідно мати два рівня напруги: 15 В та 5 В і брати для цих потреб потужність від перетворювача 600 – 24 В. П'ятнадцять вольт використовується для живлення драйвера, щоб забезпечити мінімальну напругу керування силовим транзистором. А менший рівень використовується для живлення мікроконтролера (МК), який буде керувати драйвером.

Для живлення драйвера IR2214 можна використати перетворювач на базі мікросхеми LM317. Вона зменшить напругу з 24 В до 15 В та її номінального струму в 1,5 А вистачить для відпирання та запирання транзистора.

Структурна схема перетворювача на базі LM317 зображена на рис. 3.9.

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Резистор  $R_2$  може встановлюватись в межах від 100 Ом до 1 кОм, але рекомендується брати значення цього резистора 240 Ом, тому  $R_2 = 240 \text{ Ом}$ .

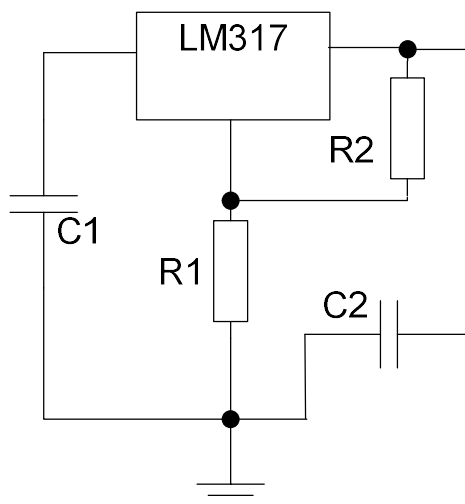


Рис. 3.9 Принципова схема перетворювача на базі мікросхеми LM317

А резистор  $R_1$  для отримання напруги 15 В розрахуємо за наступною формулою:

$$R_1 = R_2 \cdot \left( \frac{U_{вих}}{1.25} - 1 \right) = 2640 \text{ Ом}. \quad (3.2)$$

Для пониження напруги до 5 В виконаємо розрахунки за таким самим принципом:

$$R_1 = R_2 \cdot \left( \frac{U_{вих}}{1.25} - 1 \right) = 720 \text{ Ом}. \quad (3.3)$$

Розрахуємо струм, який потрібен для МК. Номінальний струм одного порта  $I_p = 20 \text{ мА}$ . Струм який споживає сам МК визначимо з рис. 3.10, при напрузі живлення 5 В струм споживання  $I_{СП} = 12 \text{ мА}$ .

Таким чином при використанні двох портів МК, струм живлення складатиме:

$$I_{МК} = 2 \cdot I_p + I_{СП} = 52 \text{ мА}. \quad (3.4)$$

Тому для живлення МК використаємо цю ж саму мікросхему перетворювача на базі LM317.

Номінального струму цієї мікросхеми вистачить для живлення МК.

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

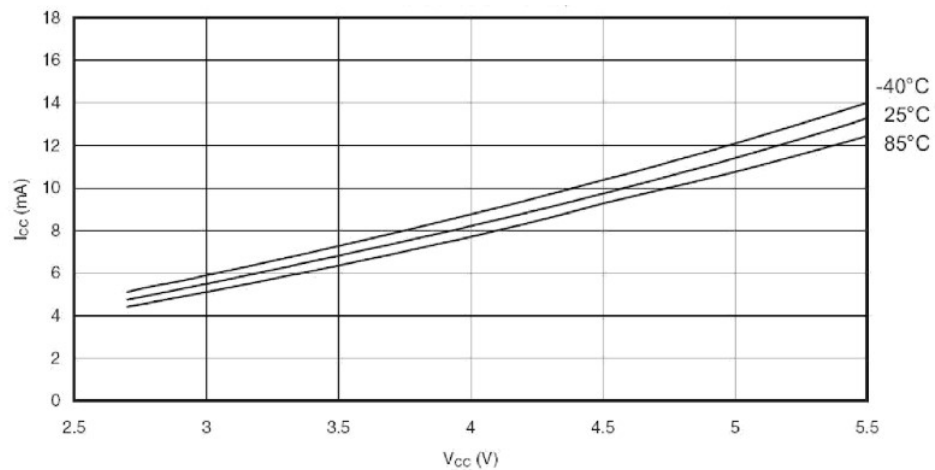


Рис. 3.10 Залежність струму від напруги живлення МК при частоті 8 кГц

Для керування транзисторами в мостовому інверторі використовується драйвер верхнього та нижнього ключа IR2213. Живлення цього драйвера відбувається аналогічно з IR2214, оскільки критерії підбору мікросхеми живлення для таких драйверів співпадають.

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В ході даної дипломної роботи було проведено коротку характеристику міських електричних транспортних засобів. Відзначено переваги та недоліки вітчизняного електротранспорту, звернувши увагу на їх проблематику.

Висвітлено одну з найбільших проблем сучасних електричних транспортних засобів, а саме проведено детальний аналіз різних видів акумуляторних батарей та проведено їх кількісне та якісне порівняння. В ході цього порівняння було визначено, що літій-іонні акумулятори найбільше підходять для сучасних видів електротранспорту, оскільки у них були найбільш підходящі показники енергоємності та струмовіддачі. Також визначено переваги транспорту з електротягою у порівнянні з з двигуном внутрішнього згорання.

При розрахунку енергії, яку витрачає електробус для пересування між зупинками, використовувались сили опору повітря, кочення, інерції та підйому. Прибравши пікові значення при розгоні транспортного засобу, значення енергії склало приблизно 34 МДж. Відповідно до цього значення витраченої енергії було розраховано значення ємності акумулятора при номінальній напрузі 340 В.

Для порівняння сучасні електробуси з повністю автономним ходом, які заряджаються тільки в депо, використовують акумуляторні батареї ємністю, понад  $300 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ , в той час як розрахована потужність акумулятора становитиме лише  $37,8 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ , що приблизно в десять разів менше. Відповідно до такого порівняння вага та вартість такої акумуляторної батареї буде також в десять разів менша, що якісно вплине на масо-габаритні показники такого транспортного засобу.

При розрахунку системи електропередачі було розроблено структурну та принципову схему системи акумуляування транспортного засобу та відповідно до цих даних проведені розрахунки елементів схеми, щоб вони витримували потужність 100 кВт та витримували деякі перевантаження. Розглянуто два

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

режими роботи такої системи та підібрано номінали елементів найбільших з розрахованих значень. Додатково розраховувався інвертор напруги з 600 до 24 В, та двопівперіодний випрямляч з нульовим виводом трансформатора, так як елементи бортової апаратури в тролейбусах працюють від напруги в 24 В.

Для коректного відновлення заряду акумулятора був розроблений алгоритм його заряджання. Він порівнює значення вхідних значень струму на напруги із заздалегідь заданими і відповідно до цих значень змінює коефіцієнт заповнення імпульсів.

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 В. П. Бойков, А.М. Сологуб, А.Ф. Андреев, Ч.И. Жданович, В.Г. Сидоров, А.С. Поварехо, Ю.Е. Атаманов, Городской электротранспорт, Минск: БНТУ, 2010, р. 413.
- 2 И.С. Ефремов, Г.В. Косарев, Теория и расчет троллейбусов. Ч1., Москва: Высшая школа, 1981, р. 293.
- 3 К. "Богдан", «Мобільність і екологічність: як сучасні тролейбуси можуть їздити без тролейв,» 2019.
- 4 И.С Ефремов, Г.В. Косарев, Теория и расчет троллейбусов. Ч2., Москва: Высшая школа, 1981, р. 248.
- 5 Д. Брызгалова, «Электроснабжение электромобиля,» Статья по материалам дипломной работы, р. 67, 2010.
- 6 В. С. Лаврус, Батарейки и аккумуляторы, Москва: НИЦ "Наука и Техника".
- 7 Мартюхін І. А., Білий М. В, «Транспортний засіб з аккумулятором зі зменшеними масогабаритними показниками,» Електронні системи та сигнали, т. 2, № 1, pp. 16-20, 2019.
- 8 О. Б. Кенесович, Повышение энергетической эффективности и эксплуатационных показателей электромобилей, Москва, 2017.
- 9 П. А. Карашков, Аккумуляторы: Справочное пособие., Москва: РадиоСофт, 2014, р. 192.
- 10 Toshiba, 17 октябрь 2018. [В Интернете]. Available: <https://habr.com/ru/company/toshibarus/blog/426623/>.
- 11 В. Васильев, «Литий-ионные и литий-полимерные аккумуляторы,» IXBT, р. 7, 2001.
- 12 В.О., Шматков, «Тенденции развития автономных безрельсовых транспортных средств,» Вісник АМУ серія "Техніка", р. 12, 2013.
- 13 Д. А. Сосин, В. Ф. Яковлев, Новейшие автомобильные электронные

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

системы, Москва: ООО "СОЛОН - Пресс", 2005, p. 240.

14 С.-Н. Chen, «Charging system and charging method thereof». United State Патент US 2011/0279226A1, 17 Nov 2011.

15 В. И. Профатилов, Т. Н. Сердюк, «Особенности эксплуатации современных аккумуляторов и батарей,» Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті, p. 12, 2014.

16 Y. G. Kim, «Electric power controlling method through a serial bus». United State Патент US 7,024,567B2, 4 Apr. 2006.

17 Atmel, Datasheet 8-bit Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash ATmega16/ATmega16L Preliminary, Atmel Corporation, 2002.

18 T. I. Modules, «Datasheet SEMiX302GB066HDs».

19 Соломонович Г. Н., Борисович К. М., Идрисович Ч. Х. и др, Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры, Москва: Радио и связь, 1985, p. 693.

20 Ж. Касторена, «Разработка понижающего преобразователя,» pp. 106-109, 2007.

21 В. В. Селифонов, А. Ш. Хусаинов, В. В. Ломакин, Теория автомобиля: учебное пособие, Москва: МГТУ "МАМИ", 2007, p. 102.

22 Ефременко И.С., Кобозев В.М., Шеченко В.В., Техническое средства городского электротранспорта, Москва: Высшая школа, 1985, p. 448.

23 Смирнов А.А., Пикалов Н.А., Определение потребной энергоемкости накопителей электробуса методами имитационного моделирования, Инженерный вестник, 2016.

24 D. V. MAIS, «Методика расчета понижающего преобразователя напряжения,» Источники питания, № 11, p. 6, Ноябрь 2011.

25 Жорж Касторен, Доналд Шелл, «Разработка понижающено преобразователя,» Силовая электроника, pp. 106-109, 2007.

26 И. В. Мелешин, Транзисторная преобразовательная техника, Москва:

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Техносфера, 2005, р. 632.

27 С. Бирюков, «Дроссели для импульсных источников питания на ферритовых кольцах».

28 F. Electric, Datasheet N-Channel Silicon Power Mosfet 2SK3528-01R.

29 E. D. Book, «Ferrites and Accessories,» p. 625, 2013.

30 Д. Кокс, «Сердечники из распылённого железа в импульсных источниках питания,» Micromaterials iron power cores, p. 16.

31 С. М. Ковбаса, Функціональна схема та спрощений розрахунок елементів силового перетворювача електроприводу змінного струму, Київ: НТУУ "КПІ", 2013.

32 N. E. Wire, «Скин-эффект».

33 Eforpower, «Методика выбора драйвера для IGBT - или MOSFET - транзистора».

34 I. Rectifier, Datasheet Half-Bridge gate driver IC IR2214/IR22141.

35 М. С. Лурье, О. М. Лурье, Иммитационное моделирование схем преобразовательной техники, Красноярск: ГОУВПО "Сибирский государственный технологический университет", 2007.

36 Вербицкий Є. В., Кисельова А. Г., Інформаційні технології - 2, Київ, 2014, р. 122.

37 Вербицкий Є. В., Кисельова А. Г., Осипенко К. С., Контекстно-залежне керування автономними системами електроживлення, Київ: АБЕРС, 2015.

38 Межаков О. Г., Склярів А. А., «ПИД-регулятор поїжающего преобразователя напряжения,» Молодой ученый, pp. 257-261, 2015.

					ДС51.510202.001.ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Поз.	Найменування	Кіл.	Примітки
	<b><u>Конденсатори</u></b>		
C1-C2	ECAP 1321 – 100±20% мкФ	2	
C11-C12	ECAP 3050 – 10000±20% мкФ	2	
C3-C10, C17-C18	ECAP 1020 – 10±20% мкФ	10	
C13-C16	UKL2AR15MDD – 0.1±20% мкФ	4	
C19	ECAP 0811 – 1±20% мкФ	1	
C20-C21	NPO – 22±10% пФ	2	
	<b><u>Резистори</u></b>		
R1-R4, R13, R14	AX50WR-12R – 12Ом±5% Ом	6	
R5, R7, R10, R12	CF-100 – 240±5% Ом	4	
R6, R8, R11	CF-50 – 3±5% кОм	3	
R9	MFR4-600RFI – 600±1% кОм	1	
	<b><u>Діоди</u></b>		
VD1-VD2, VD5, VD7	10KF6	5	
VD3-VD4	150EBU02	2	
	<b><u>Дроселі</u></b>		
L1	CB43 – 0,47 мкГн	1	
	<b><u>Мікросхеми</u></b>		
DD1-DD2	IR2213	2	
DD3	IR2214	1	
DD4	ATmega16	1	
DDA1-DDA4	LM317	4	

					ДС51.510202.001 ОП					
Зм	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Зарядний пристрій високовольтного акумулятора	Лім.		Аркуш	Аркушів	
Розроб.		Білий М.В		11.06.19				1	2	
Перевір.		Вербицький Є.В.		11.06.19						
Т. контр.										
Н. контр.		Батрак Л.М.		11.06.19						
Затверд.		Вербицький Є.В.		11.06.19		Перелік елементів	КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ каф. ПЕ			

[illegible]

## ABSTRACT

The bulk of urban electric vehicles are trams and trolleybuses. Domestic manufacturers of vehicles on their own initiative have for a long time maintained the trends of ecological safety of electric vehicles and are trying to increase their comfort in the cities. Along with this, new, more complex tasks appear for the creation of the most comfortable, energy-efficient and universal types of urban electric transport.

The most important operational parameter of the electric bus, which determines the efficiency of its use for passenger transportation, along with passenger capacity, is the stand-alone flow, which is directly related to the capacity of the traction battery. Today, on the example of designs of prototype electric buses of domestic and foreign manufacturers, there is a clear tendency to ensure the autonomous movement of an electric bus at the level of daylight, which for example is 100-150 km for large cities. Electric buses have limited mobility opportunities in urban transport modes. Therefore, the idea is to integrate a high-voltage accumulator of reduced capacity into a trolley bus, giving advantages both from an economic point of view and from the side of the mobility of electric transport in cities. Such electric transport compared with electric buses, which have large-capacity rechargeable batteries, will receive a reduced total cost due to the small capacity of the battery.

After analyzing the characteristics of different types of batteries, the choice fell on lithium cells that have the highest specific power, specific energy consumption, relatively small self discharge and a short charging time.

Lithium current sources can be divided into several types, according to the materials used in their manufacture. Depending on these materials, these elements acquire certain features in their operation.

In the general case, electric transport by charging method can be classified into contact with contact pads: pantograph or trolley and contactless, which are charged by wireless methods: static or dynamic. The dynamic charging method is

the most difficult to implement, but it is most convenient. At the moment, charging through the pantograph will be used, for the convenience of project implementation.

The charging method for IU is best suited for charging lithium sources. It is one of the most widely used methods for charging batteries, it is most expedient to use for long-term battery life. When the battery is connected, charging is carried out by direct current, until the voltage reaches the set value, and then the transition to charging with constant voltage occurs. In order to support the battery in buffer mode, this method performs battery charging, withstand some pauses in which the battery, due to self-discharge currents, reaches a slightly lower voltage than the maximum allowable.

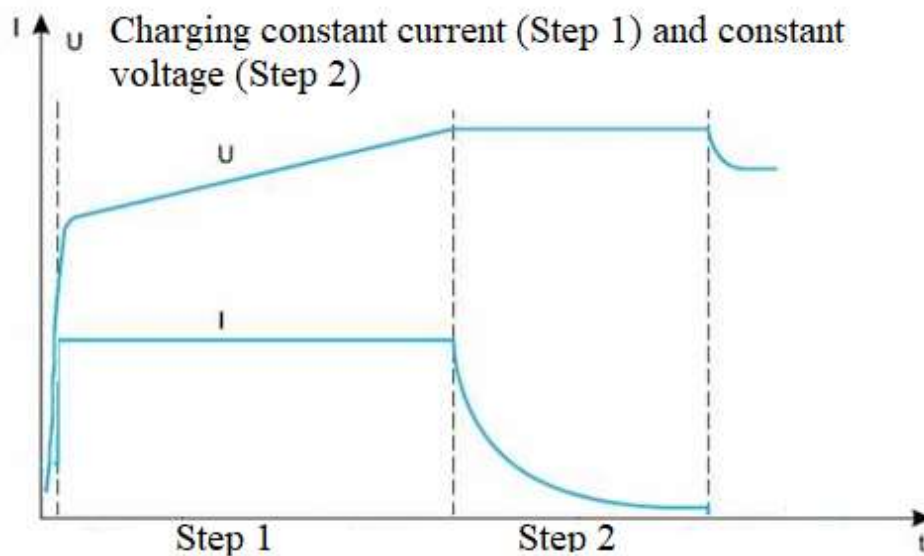


Fig. 1 Charging the battery: Step 1 – Constant current; Step 2 – constant voltage

The project proposes replacing a regular charger, using a device that can transport energy from the on-board network to the battery when charging and from the battery to the traction system when discharged. Usually, at the initial moment of vehicle movement, it spends most energy, so this charger has the ability to balance energy by using part of the energy from the battery to reduce the load on the network.

Without developed infrastructure, the electric bus loses many of its advantages and becomes a problem. You can charge the electric bus in three different

ways: long night charging, recharging while driving on a given route, charging at terminals and fast charging at public transport stops.

During a quick charge, you can transmit electrical energy to the battery faster than the chemical processes in the battery react to it, thereby damaging it. Therefore, the use of very powerful charging stations up to 600 kilowatts will not be the best solution for charging large capacity batteries.

In any electrical systems or devices, there are ominous losses: A part of the electricity is transformed into heat and does not perform a useful job. The higher the voltage of the electricity system, the (at the same power) less current, less ohmic losses and the lower price of the system itself. That is, the use of a high-voltage battery for powerful systems has a gain over useful power compared with low-voltage batteries. Accordingly, the purpose of using rechargeable batteries with consecutive battery connection is to reduce losses and increase the efficiency factor (efficiency).

In order to calculate the parameters of the system of accumulation, it is necessary to calculate the energy that the electric bus uses to make the movement between the stops and determine the value of the power that the electric bus wastes to overcome the distance between the stops. To do this, we will calculate the capacity of the battery pack in order for the electric bus to be able to overcome the distance between the stops autonomously.

The total force required for the TP motion is decomposed into such components as the air resistance force, the propulsion strength, the resistance of the lift, the rolling resistance force and the inertia force. By locating and integrating these forces you can find instantaneous energy values at each time of the vehicle's movement.

The block diagram of equipment of a fir-tree is shown in Fig. 2

The diagram shows that the battery interacts with the traction system and on-board equipment through the charger. Thanks to this technology, we get full control over the discharge mode of the battery.

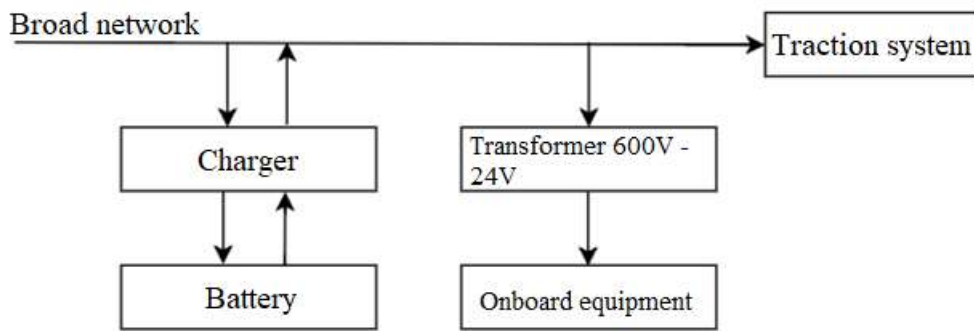


Fig. 2 Structure of the electric bus

The control of the developed device is carried out using the microcontroller and drivers. The microcontroller performs the function of generating a PWM signal to control the torque opening and question of transistors. And the driver already performs direct control of the power switches, it provides sufficient voltage and current values for charging and discharging the power key lock with large currents. For controlling the transistors in the bridge inverter, the IR2213 upper and lower key drivers are used. And for the power part of the charger - IR2214. To power these microcircuits, LM317 low-voltage converters powered from 24 V are converted to onboard equipment by converting the high voltage voltage inverter voltage, transformer and two-phase rectifier with zero output. The LM317 will provide a voltage of 15 and 5 V, depending on the calculations.

For correct recovery of battery charge an algorithm for its charging was developed. The developed algorithm allows to charge the IU battery by the method, by finding and comparing the measured values of current and voltage with the reference ones. In this way, the battery will not feel stressful, it will increase the life of its service.

In the diploma project a structural diagram of a charger was developed that can control the charging and discharging modes of a high-voltage battery of an electric bus, and the basic circuit diagram of such a charger is compiled. For this, calculations of the propulsion forces acting on this vehicle were performed and the energy that was to be used to overcome these forces was determined.

According to energy, the capacity of the battery pack and its dimensions are calculated. Schedule operating modes are calculated.

The algorithm for charging calculated accumulator battery was developed and simulation of such converter was carried out.